



Lokalitet nr. 219-3 Collstrupgrunden

Udredning vedr. forureningssituationen på og omkring grunden 1977 – 2009

Nielsen, Sanne Skov; Jakobsen, Rasmus; Kjeldsen, Peter

Publication date:
2010

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Nielsen, S. S., Jakobsen, R., & Kjeldsen, P. (2010). *Lokalitet nr. 219-3 Collstrupgrunden: Udredning vedr. forureningssituationen på og omkring grunden 1977 – 2009*. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet & Region Hovedstaden.

General rights

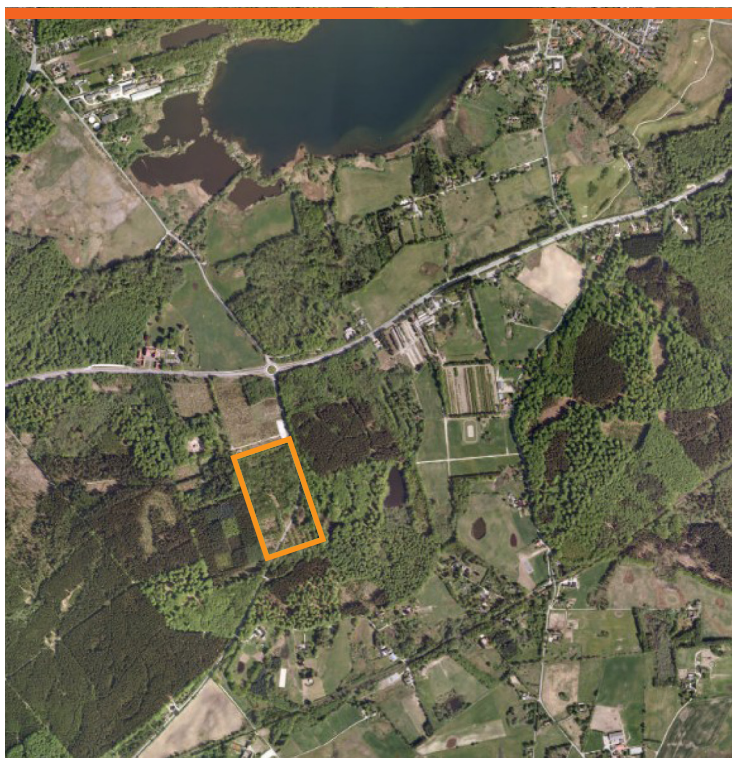
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Lokalitet nr. 219-3 Collstrupgrunden

Udredning vedr. forureningssituationen på og omkring grunden 1977–2009



Sanne Skov Nielsen, Rasmus Jakobsen og Peter Kjeldsen
DTU Miljø, april 2010

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	9
1.1	Baggrund	9
1.2	Formål	10
1.3	Fremgangsmåde	10
2	Historisk redegørelse for Collstrupgrunden	12
3	Forureningskomponenter	14
3.1	Organiske forureningskomponenter	14
3.2	Uorganiske forureningskomponenter	14
3.3	Kvalitetskriterier i jord og grundvand	17
4	Geologiske, hydrogeologiske og geokemiske forhold	18
4.1	Geologisk model	19
4.1.1	Tværsnit A - Collstrupgrunden-Esrum Sø	20
4.1.2	Tværsnit B – Parallelt med Hillerødvejen	21
4.1.3	Tværsnit C - Sekundære grundvandsmagasiner	21
4.2	Stømningsforhold og grundvand	25
4.2.1	Terrænnært grundvand	25
4.2.2	Sekundære grundvandsmagasin	27
4.2.3	Primære grundvandsmagasin	28
4.3	Geokemiske forhold	30
4.3.1	Målinger af specieringen af forureningskomponenterne	32
4.3.2	Mobiliteten af forureningskomponenterne på Collstrupgrunden	32
5	Forureningsudbredelse	34
5.1	Jordforurening	34
5.1.1	Arsen	35
5.1.2	Krom	35
5.1.3	Kobber	35
5.2	Grundvand	36
5.2.1	Det terrænnære grundvand	36
5.2.2	Det sekundære grundvand	37
5.2.3	Det primære grundvand	38
5.3	Overfladevand og sediment i vandløb og grøfter	38
5.4	Møllekrogen og Esrum Sø	43
6	Forureningstransport	45
6.1	Transportveje	45
6.2	Beregninger af arsenudvaskningen fra Collstrupdepotet	45
7	Afværgeforslag	47
7.1	Opsamling af de eksisterende afværgekataloger	47
7.1.1	Rensning af forurenede grundvand	49
7.1.2	Rensning af den forurenede jord	49
7.1.3	Deponering af jord	49
7.2	Nye afværgeløsninger	50
7.2.1	Stabilisering med jern	50
7.2.2	Permabel reaktiv barriere (PRB) med Fe(0)	50
7.2.3	Behandling af Cr(VI)	51
7.3	Vurdering af afværgeløsninger	52
8	Konklusion og konceptuel model	54
8.1	Jordforurening	54
8.2	Grundvand	54
8.3	Recipienterne	55

8.4	Konceptuel model	56
8.5	Afværgeløsninger	57
9	Litteratur	59
9.1	Undersøgelsesrapporter om Collstrupdepotet	59
9.2	Supplerende litteratur	61

Forord

Nærværende rapport indeholder en opsamling, sammenfatning og vurdering af de mange forureningsundersøgelser der er lavet på og omkring Collstrup-grunden ved Hillerød siden træimprægneringsvirksomheden lukkede i 1976. De fleste af forureningsundersøgelserne er rekvireret af det tidligere Frederiksborg Amt, mens enkelte nyere undersøgelser, som er refereret i rapporten, er gennemført af Region Hovedstaden efter kommunalreformen.

Projektet blev igangsat på initiativ af Region Hovedstaden i efteråret 2008 og er afsluttet i 2010. John Flyvbjerg, Kim Sørensen og Povl Aaboe Rasmussen fra Region Hovedstaden har udgjort projektets følgegruppe.

Tekst og grafik er udført af Sanne Skov Nielsen, phd-studerende, og er kvalitetssikret af Rasmus Jakobsen og Peter Kjeldsen, alle DTU Miljø. Grafiker Lisbeth Brusendorff har lavet omslaget.

*Sanne Skov Nielsen
Kongens Lyngby, april 2010*

Sammendrag

Collstrupgrunden, som ligger syd for Esrum Sø, er kraftigt forurenet med bl.a. arsen, krom og kobber. Navnet på grunden stammer fra den nu nedlagte træimpræneringsvirksomhed Collstrup, der i perioden 1936 til 1976 imprægnerede telefonpæle på stedet.

Nærværende rapport er en opsamling af de mange undersøgelser, der er gennemført med udgangspunkt i forureningen siden virksomhedens lukning i 1976 til og med udgangen af 2009. Rapportens formål er at give en samlet præsentation af den eksisterende viden om forureningsudbredelsen, afdække mangler i de eksisterende undersøgelser og give en oversigt over forskellige afværgeforslag for grunden.

På basis af de mange undersøgelser er der opstillet en konceptuel model for, hvordan forureningen kan spredes til omgivelserne og ned i de underliggende grundvandsmagasiner. Den konceptuelle model viser, at der potentielt kan ske en direkte spredning af forurening til overfladevand via de nordøstlige grøftesystemer, en spredning af forurening til det sekundære grundvand med videre tilledning til Esrum sø, samt en potentiel spredning til dybereliggende, udnyttelige grundvandsmagasiner.

- Nyere undersøgelser har vist, at transporten af arsen i de vandløbssystemer, der løber ud i Esrum Sø, ikke er større end i vandløbssystemer beliggende væk fra Collstrupgrunden. I dag kan man således ikke spore en påvirkning af søen fra vandløbs-systemerne, der afvander Collstrupgrunden. Det skyldes, at arsen ophobes i sedimenterne i drængrøfterne tættere på grunden.
- Tæt på grunden er der fundet høje koncentrationer af arsen i terrænnært grundvand, og med nedsivning til det sekundære grundvand vil der formentlig også findes en forureningsfane her. Det kan ikke udelukkes, at en del af dette grundvand kan strømme direkte op i Esrum Sø. Det er usikkert, om arsenforureningen indeholdt i dette grundvand er nået frem til Esrum sø, da arsen tilbageholdes i en vis grad til jord og grundvandssedimenter. Transporttiden for arsen fra grunden til søen er således anslået til at være 30-500 år.
- Der kan være risiko for en videre spredning af arsen til dybereliggende grundvandsmagasiner. Det er uvist om det lerlag, som flere steder er observeret mellem det sekundære grundvand og det dybereliggende grundvand, er gennemgående i hele området nedstrøms for Collstrupgrunden – der er simpelthen ikke nok dybe borer i området til at kunne afgøre dette.

På basis af gennemgangen af de eksisterende undersøgelser gives der i rapporten anbefalinger til eventuelle yderligere undersøgelser, som vil kunne forbedre grundlaget for en sikrere risikovurdering. Til slut i rapporten gennemgås forskellige afværgeløsninger der, kan anvendes til risikoreduktion for forureningsspredning fra Collstrupgrunden. Det sandsynliggøres, at der findes anvendelige afværgeløsninger med en væsentlig mindre udgiftsramme end de 250 millioner kroner, som tidligere har været meldt ud.

I Indledning

I.1 Baggrund

Collstrupgrunden, som ligger syd for Esum Sø, er kraftig forurenet med bl.a. arsen, krom og kobber. Navnet stammer fra den nu nedlagte træimprægneringsvirksomhed Collstrup, der i perioden 1936 til 1976 imprægnerede bl.a. telefonpæle på stedet. Området figurerer også som affaldsdepot 219-3 Stenholtsvang, men er nu klassificeret som forurenet område, kortlagt på vidensniveau 2. Placeringen af grunden fremgår af figur I.1.



Figur I.1: Placeringen af Collstrupdepotet (markeret med rødt)

Skov og Naturstyrelsen ejer arealet, der i dag er indhegnet for at undgå at offentligheden udsættes for kontakt med den forurenede jord. Området bærer tydeligt præg af forureningen, idet det på grunden ses mosbegrøede pletter i græsbevoksningen og træer med misvækst. I forbindelse med en forureningsundersøgelse i 1989 blev der opgravet 150 tromler delvist fyldt med tungmetalholdigt slam. Senere er grøfter, der afvander grunden, oprenset på grund af forhøjede arsenkoncentrationer i bundsedimenterne.

Der sker fortsat en udvaskning af især arsen fra den forurenede jord til det terrænnære grundvand. En del af det forurenede grundvand løber ud i de grøfter og vandløb, som afvander grunden. Det kan ikke afvises, at der sker en transport af arsen til dybereliggende magasiner, hvorigennem grundvandet strømmer i retning af Esum Sø. Der kan muligvis også ske en opsvimning af forurenede grundvand til vandløbssystemet i det lavtliggende vådområde tæt på Møllekrogen, der er navnet på den sydlige ende af Esum Sø.

Skov og Naturstyrelsen, Hillerød Kommune, Frederiksborg Amt og senest Region Hovedstaden har siden 1979 gennemført en række undersøgelser af forureningen på grunden og af belastningen af grundvand, vandløb og Esrum Sø med især arsen. Der er desuden undersøgt forskellige muligheder for at afværge forureningen. Det er disse undersøgelser, der danner grundlag for nærværende udredning.

1.2 Formål

Formålet med denne rapport er med udgangspunkt i de allerede eksisterende undersøgelser og vurderinger af Collstrupdepotet og recipienterne at skabe et overblik over forureningens omfang og spredningsveje. Det er desuden rapportens formål at tilvejebringe et overblik over de forskellige forslag til afværgeforanstaltninger, som har været skitseret for grunden, samt give et overblik over, hvilke afværgeteknikker, der i dag anses for velegnede til at reducere jord- og grundvandsforurening fra træimprægneringsgrunde. I rapporten er der især fokuseret på stoffet arsen, som vurderes at være den mest kritiske forureningskomponent, idet der er konstateret forhøjede arsenkoncentrationer i grundvandet, i grøftesystemet i skoven og i Møllekrogen, Esrum Sø

1.3 Fremgangsmåde

Der er foretaget en gennemgang af elektronisk materiale fremsendt af Region Hovedstaden (rapporter over forureningsundersøgelser, afværgeforslag m.v.). Herudover er der indhentet supplerende litteratur, især i forbindelse med afværgemetoder. I tabel 1.1 ses en oversigt over de forureningsundersøgelser, der er lavet i forbindelse med Collstrupdepotet. Rapporterne er navngivet efter den rådgiver, der har skrevet rapporten for nemmere at kunne identificere den enkelte rapport i teksten.

Periode	Hovedforfatter	Indhold	Referencer
1977	DGU	Forureningsundersøgelse Kun få analyser	DGU 1977
1989-1994	Samfundsteknik	Omfattende forureningsundersøgelse Afværge af hotspots og monitoring Afværgekatalog, afværgeforslag	Samfundsteknik 1989a Samfundsteknik 1989b Samfundsteknik 1989c Samfundsteknik 1990 Samfundsteknik 1992 Samfundsteknik 1991 DTH 1992 Krüger 1994 Rambøll 1994a
1991-1995	Cowi m.fl.	Akkumulering af arsen i Møllekrogen	Frederiksborg Amt 1991 Cowi 1993 Cowi 1994 Levnedsmiddelstyrelsen 1995
1994-1996	Rambøll	Økonomisk vurdering af afværgeløsninger Udvaskning af jord Monitoring og etablering af ekstra boringer i terrænnære grundvand	Rambøll 1994 VKI 1994 Rambøll 1995
2000	Niras	Monitoring af boringer og overfladevand	Niras 2000
2006	Falkenberg	Afstrømning i grøfter Monitoring af grøftesystemet	Falkenberg 2006a Falkenberg 2006b
2009	Orbicon	Vandløbsundersøgelse	Orbicon 2009

Tabel 1.1: Oversigt over rapportserier og undersøgelser med udgangspunkt i Collstrupedpotet. En komplet liste findes i referencelisten, kapitel 10.1

2 Historisk redegørelse for Collstrupgrunden

Collstrupgrunden ligger i Stenholtsvang 5 km nordøst for Hillerød. På de 6 hektar har der i 40 år ligget en træimprægneringsvirksomhed, der især fremstillede telefonpæle. Som imprægneringsmiddel har været anvendt CCA, der er forkortelsen for de virksomme metaller kobber, krom og arsen (Cu, Cr og As). Brugen af stofferne har medført omfattende jordforurening. I figur 2.1 ses en plantegning af grunden med placeringen af de nu nedrevne bygninger. Her følger en kort historisk oversigt over aktiviteterne på grunden, referencer findes i tabel 1.1.

1936

De Danske
Imprægneringsanstalter A/S
lejer 3 ha af Statsskovvæsenet.
Der imprægneres med
Boucheriemetoden. Først
med kobbervitriol og efter
1939 med NAF-salt bestående
af natriumflourid, arsenik og dinitrophenol.

Boucheriemetoden

En hel stamme med intakt bark påspændes
en flange, der presser imprægneringsvæsken
gennem stammen, til det drypper ud af den
anden ende.

Eventuelle huller i barken ombindes med
klude for at forhindre spild.

1955

Driften omlægges til Dr. Gewelkes metode. Der imprægneres med
kobber, krom og arsen.

Dr. Gewelkes metode

De afbarkede stammer nedsænkes i et kar
med imprægneringsvæske. Imprægnerings-
væsken suges gennem stammen og fortrænger
derved saften i træet. Imprægneringskarrene
var under tag.

1968 Jespervej omlægges til nuværende
vejføring gennem den sydlige del af grunden.

1976 Driften lukkes ned.

1977

Pladsen afvikles. Skov og Naturstyrelsen stiller som krav til afviklingen,
at bygninger nedrives og imprægneringsbassinerne tømmes for slam og
opfyldes. Der laves efterfølgende en forureningsundersøgelse ved DGU

1979

Arealet tilplantes med birk og eg og indhegnes

1986

Efter et anonymt tip fra en tidligere medarbejder findes gennemtærede
metaltromler indeholdende imprægneringsslam på fyldpladsen.

1989

Der igangsættes en omfattende forureningsundersøgelse og
afværgeforanstaltninger på fyldpladsen i grundens sydlige ende. Bark og
nedgravede tromler, bortgraves og sendes til Kommunekemi.

1993?

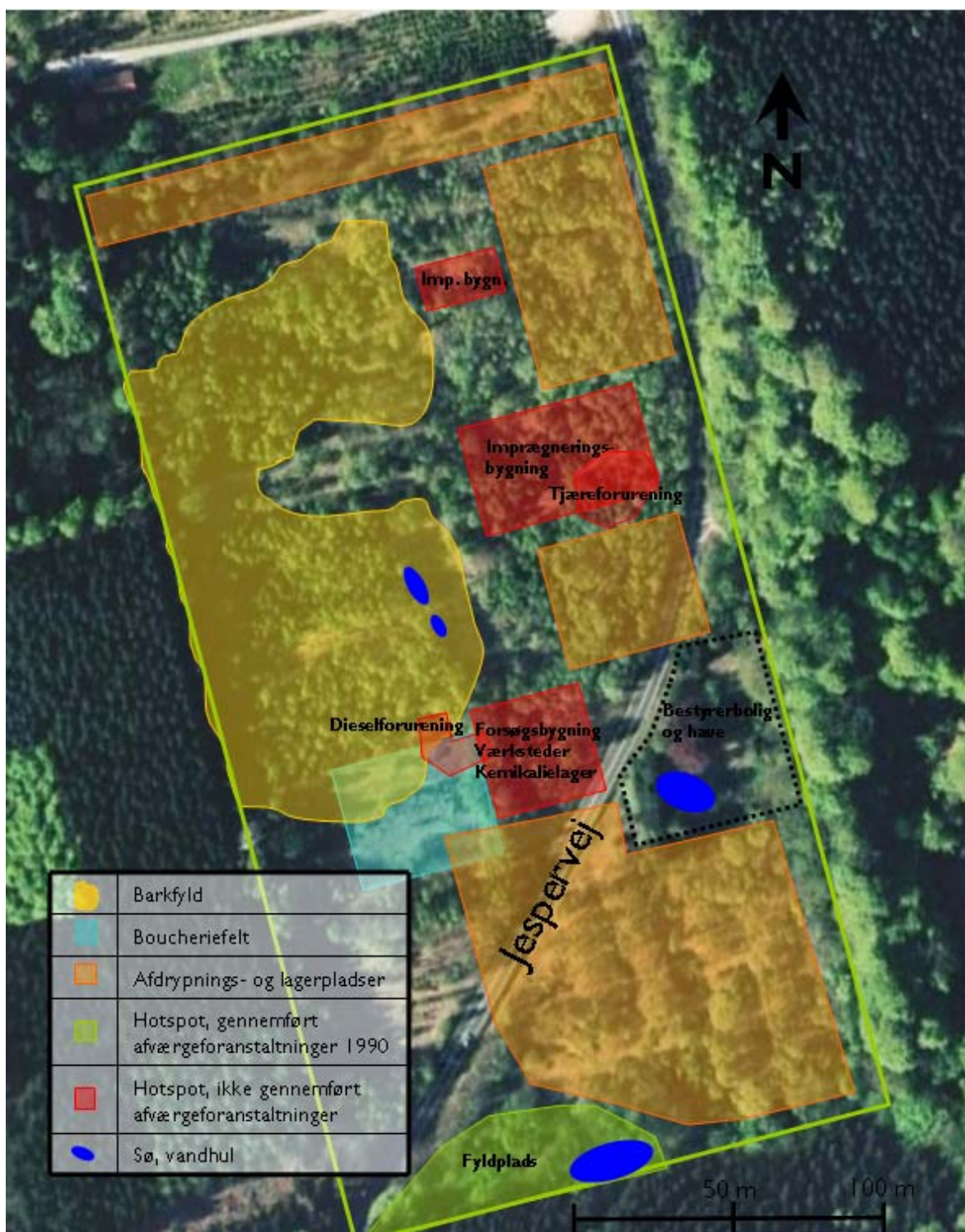
Hjortedamshuset (bestyrerboligen) nedrives. Der er nu ikke længere
bygninger på depotet.

1994

Der igangsættes en undersøgelse af arsenbelastningen af Esrum Sø ved
COWI

1996

Frederiksborg Amt oprenser 1500 meter grøfter i skoven NØ for
depotet. Jord og sediment herfra deponeres på grunden.



Figur 2.1: Oversigtskort over Collstrupdepotet tegnet på baggrund af Samfundsteknik 1989a. Forekomst af barkfyld er tegnet på baggrund af Samfundsteknik, 1989b samt forfatterens observationer.

3 Forureningskomponenter

På Colstrupgrunden er der i forbindelse med træimprægneringen anvendt en række organiske og uorganiske stoffer, der kan være toksiske for det omgivende miljø. Dette kapitel giver en oversigt over stoffernes kemiske og økotoksikologiske egenskaber. Desuden er de gældende kvalitetskriterier for stofferne i jord og grundvand refereret.

3.1 Organiske forureningskomponenter

Der er konstateret 3 separate forureninger med organiske forureningskomponenter på grunden: 2,4-Dinitrophenol, har været brugt som imprægneringsmiddel sammen med arsen, og findes derfor som diffus forurening. Desuden findes en dieselurening, der formentlig stammer fra en utæt tank ved mandskabsbygningen og en tjæreforurening ved et imprægneringskar. Placeringen af diesel og tjæreforureningerne kan ses i figur 2.1.

Tabel 3.1 herunder giver et overblik over stoffernes relative nedbrydningspotentialer og mobiliteten i grundvand. Parametrene er angivet relativt med 1-3 plustegn eller minus for immobilt/ikke nedbrydeligt. Diesel er et blandingsprodukt af forskellige organiske forbindelser med meget varierende nedbrydelighed. Mere end 30 år efter forureningens opståen vil de lette kulbrinter være nedbrudt mens de mere olieagtige stoffer stadig kan findes i grundvandet. Diesels nedbrydelighed er derfor markeret med (+).

	Nedbrydning i jord	Nedbrydning i grundvand	Mobilitet i grundvand	Forekomst på Collstrup
2,4-Dinitrophenol¹	++	-	+++	Målt i øvre grundvand (op til 0,8 µg/L) i SV-del af grunden ³
Diesel²	++	(+)	+	Umiddelbart nord for forsøgsbygningen ³
Tjære² (Naphthalen og phenantren)	+	-	-	Ved imprægneringsbygning, tæt på Jespervej ³

Tabel 3.1: Organiske forureningskomponenter ¹Howard (1989) ²Miljøstyrelsen (1996) ³Samfundsteknik (1989b)

De gældende kvalitetskriterier i jord og grundvand for ovenstående organiske forureningskomponenter er sammenfattet i tabel 3.3.

3.2 Uorganiske forureningskomponenter

I tabel 3.2 findes en oversigt over egenskaberne for de uorganiske forureningskomponenter. Metaller og metalloider optræder som forskellige specier afhængig af pH og redoxforhold. Specierne har på grund af deres ladning og kemiske egenskaber ikke samme mobilitet og toxicitet. Derfor er det vigtigt af skelne mellem f.eks. Cr(VI) og Cr(III). I oversigtstabellen, tabel 3.2, er mobiliteten og toksiciteten angivet relativt for de forskellige stoffer med +/-, som for de organiske forbindelser.

Arsen optræder i vandige opløsninger som oxyanioner (f.eks. H_2AsO_3^-), der har stor betydning for stoffets kemiske opførsel. Samme opførsel findes hos fosfat (f.eks. HPO_4^{2-}), og begge stoffers mobilitet styres af indholdet af jern- og aluminiumoxider i jorden, da oxyanionerne sorberes stærkt til oxidernes overflader. **Arsenat**, er den dominerende specie under aerobe forhold, mens **arsenit** overvejende findes under anaerobe forhold. Ofte optræder begge specier dog samtidigt, formentlig fordi

omdannelsen sker langsomt. Arsen findes desuden som organiske forbindelser, der er markant mindre toksiske. Disse dannes i jorden ved mikrobiel aktivitet og er hyppigt forekommende ved arsenforureninger.

Imprægneringsvæsken indeholder **kromat**, der er et kræftfremkaldende stof på grund af sin stærkt oxiderende effekt. Ved mødet med organisk materiale reduceres kromat til **kromit**, der udfældes som kromoxider ved pH over 6. Kromat er meget mobilt i grundvandsmiljøer, da disse indeholder en begrænset mængde reaktivt organisk materiale.

Kobber sorberes stærkt til organisk materiale ved pH over 6,5 og vil derfor være at finde i den øverste, organiske del af jordprofilen. Hvis det infiltrerende vand indeholder opløst organisk materiale kan kobber sorberes eller komplekseres til dette og transporteres hermed. Kobber mobiliseres deuden ved lav pH.

Fluorid er langt mindre toksisk end de førnævnte metaller, men er medtaget her, da flere jordprøver på Collstrupgrunden overskrider jordkvalitetskriteriet mht. dette stof (se mere i kapitel 5). Fluorid sorberes kun meget svagt til sedimentet og vil derfor måske kunne bruges til at finde en eventuel forureningsfane. Fluorid findes dog i kalkmagasiner i naturligt høje koncentrationer (1-5 mg/L), og overskrider derfor ofte kriteriet for drikkevand på 1,5 mg/L (Miljøstyrelsen, 2008).

De gældende kvalitetskriterier i jord og grundvand for de uorganiske forureningskomponenter er sammenfattet i tabel 3.3.

Navn	Redox trin	Speciering	Mobilitet grundvand	i Opførsel i Jord	Toksicitet	Forekomst på Collstrup
Arsenat	As(V),	H_2AsO_4^- (pH<7) HAsO_4^{2-} (pH>7)	+	Sorberes på jernoxider ved lav til neutral pH Sorberes på ler	+	Forekommer i jord og grundvand
Arsenit	As(III),	H_3AsO_3 (pH>9) H_2AsO_3^- (pH <9)	++	Sorberes på jernoxider ved neutral pH Sorberes på ler	++	Forekommer i jord og grundvand
Arsin	As(-III)	AsH_3 (gas)	-	Gas i poreluften	+++	Usandsynligt, da redoxpotentialer er for højt ⁶
Kromat	Cr(VI)	CrO_4^{2-} (pH>6,5)	++	Reduceres ved kontakt med organisk materiale til Cr(III)	++	Aldrig målt speciering af Cr. Findes muligvis i grundvand
Kromit	Cr(III)	Cr^{3+} $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (fast fase)	-	Udfældes som Cr-hydroxider, $\text{Cr}(\text{OH})_3$	-	$\text{Cr}(\text{OH})_3$ udgør formentligt den største pulje af Cr i jorden
Kobber	Cu(II)	Cu^{2+} $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ CuHAsO_3 (begge mineraler grønne)	(+) Mobilt på kolloider og som organiske komplekser	Sorberer stærkt til organisk materiale. Kan mobiliseres hvis pH falder til <6.5 eller ved kompleksering på opløst organisk materiale	+	Sandsynligvis bundet til organisk materiale i jorden. Formentlig delvist udfældet som mineralfase i jorden (grønne klumper)
Fluorid	F ⁻	F ⁻ CaF_2 (fast fase)	+++	Sorberer svagt til jernoxider. Udfældes som CaF_2 i kalkrige miljøer	+	Fundet i jorden og terrænnært grundvand ⁵

Tabel 3.2 Uorganiske forureningskomponenter ¹ Smedley og Kinniburgh (2002) ² Fendorf (1995) ³ Miljøstyrelsen (1996) ⁴ Pickering (1985) ⁵ Samfundsteknik (1992) ⁶ Samfundsteknik (1989b)

3.3 Kvalitetskriterier i jord og grundvand

I tabel 3.3 er de gældende kvalitetskriterier for de forureningskomponenter, som er omtalt i afsnit 3.1 og 3.2 sammenfattet. Kvalitetskriterierne findes på Miljøstyrelsens "Liste over kvalitetskriterier i relation til forurenede jord og kvalitetskriterier for drikkevand" (Miljøstyrelsen, 2009)

Stof/stofgruppe	Jordkvalitets-kriterium ¹	Afskærings-kriterium ²	Grundvands-kvalitets-kriterium ³
	mg/kg	mg/kg	µg/l
2,4-Dinitrophenol	10	-	0,5
Diesel (C5-C35 kulbrinter)	100	-	9
Tjære: Sum PAH	4	40	0,1
Arsen, uorganisk	20	20	8
Krom (Cr(III) + Cr(VI))	500	1000	25
Kromat (Cr(VI))	20	-	1
Kobber	500	1000	100
Fluorid	20	-	1,5 ⁴

Tabel 3.3: Kvalitetskriterier i jord og grundvand for forureningskomponenter relateret til træimprægneringsvirksomhed (Miljøstyrelsen, 2009)

¹Jordkvalitetskriteriet er en værdi, der skal sikre, at den fri og mest følsomme anvendelse af jorden er sundhedsmæssig forsvarlig (f.eks. jord i private haver, børnehaver og legepladser)

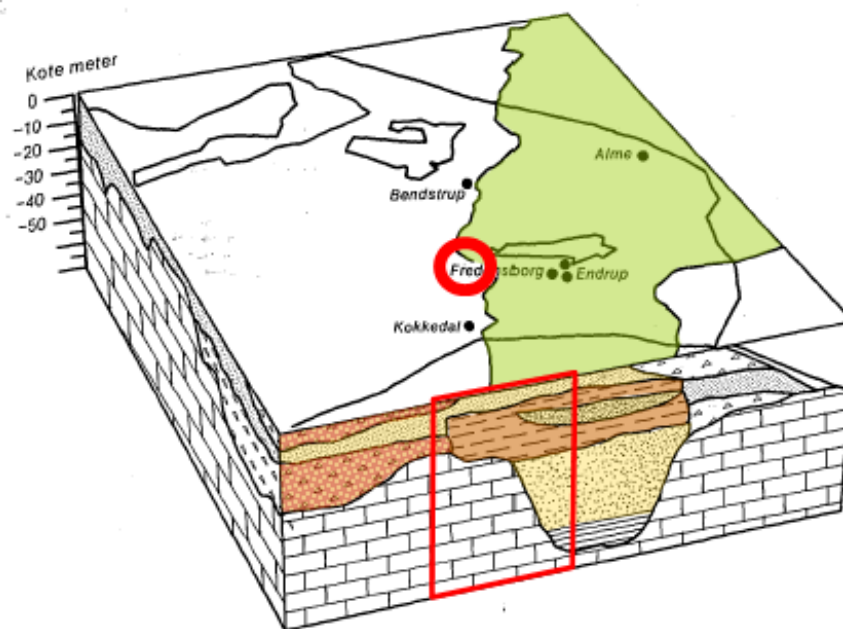
²Afskæringskriteriet angiver det niveau, hvorover der skal foretages afskæring af jorden, hvis arealanvendelsen er bolig, børneinstitutioner eller legepladser.

³Grundvandskvalitetskriterierne angiver den kvalitet grundvand skal have for at kunne leve op til drikkevandskravene efter normal, traditionel vandbehandling.

⁴Kvalitetskriterie for drikkevand jf. Miljøstyrelsen (2006)

4 Geologiske, hydrogeologiske og geokemiske forhold

Collstrupgrunden ligger på kanten af den regionale formation Esumdalen, også kaldet Alnarpdalen, da den strækker sig på tværs af Nordsjælland og Sydsverige. Dalen er ikke synlig i landskabet, men er en dalsenkning i prækvartæret, der efterfølgende er fyldt med marine og glaciale sedimenter. Disse sedimenter udgør et af de vigtigste grundvandsmagasiner i Nordsjælland. Esumdalens overordnede geologi findes beskrevet af Konradi (1992) og Schuldt (1981) og der findes en skitse over lagfølgen i Samfundsteknik (1989a). I figur 4.1 ses Nordsjælland med Esumdalen markeret med grønt.



Figur 4.1: Den overordnede geologi i Esumdalen. Collstrupgrunden er markeret med en rød prik. Tværsnit A (se figur 4.2) løber i den røde box markeret på figuren. Modificeret efter Konradi (1992)

Den geologiske lagfølge i området syd for Esum Sø er vist i tabel 4.1. Lagfølgen i området stemmer godt overens med tidligere tolkninger (figur 4.1). Den eneste formation, der mangler i forhold hertil, er den øverste smeltevandsserie. Denne er ret lokal og findes kun i modellens sydligste del, under og omkring Collstrupdepotet.

Geologisk formation	Dybde (m)	Beskrivelse	Alder	Grundvandsmagasin
Lokal smeltevandsserie	0-5	Vekslende lerede og sandede lag	Postglacial	Terrænnært
Øvre Moræne	0-20	Moræne, ofte sandet	Ungbaltisk ¹	Hydraulisk kontakt mellem det terrænnære og det sekundære magasin
Øvre sandede serie	20-40?	Smeltevandssand	Mellem Weichsel	Sekundært
Ler (moræne i syd, marint ler i nord)	40?-60?	Ler, mergel (187.675)	Mellem Weichsel ²	"der antages at være væsentlig hydraulisk kontakt mellem øvre og nedre sandede serie" (Samfundsteknik 1990)
Nedre sandede serie Esrumsandet	40-50	Smeltevandssand	Weichsel ¹	Primært
Grønsandskalk og kalk	50-	Danienkalk overlejret af grønsandskalk	Danien	Primært. Boringer på Stenholt vandværk er filtersat i denne formation.

Tabel 4.1: Overordnet stratigrafi i området syd for Esrum Sø

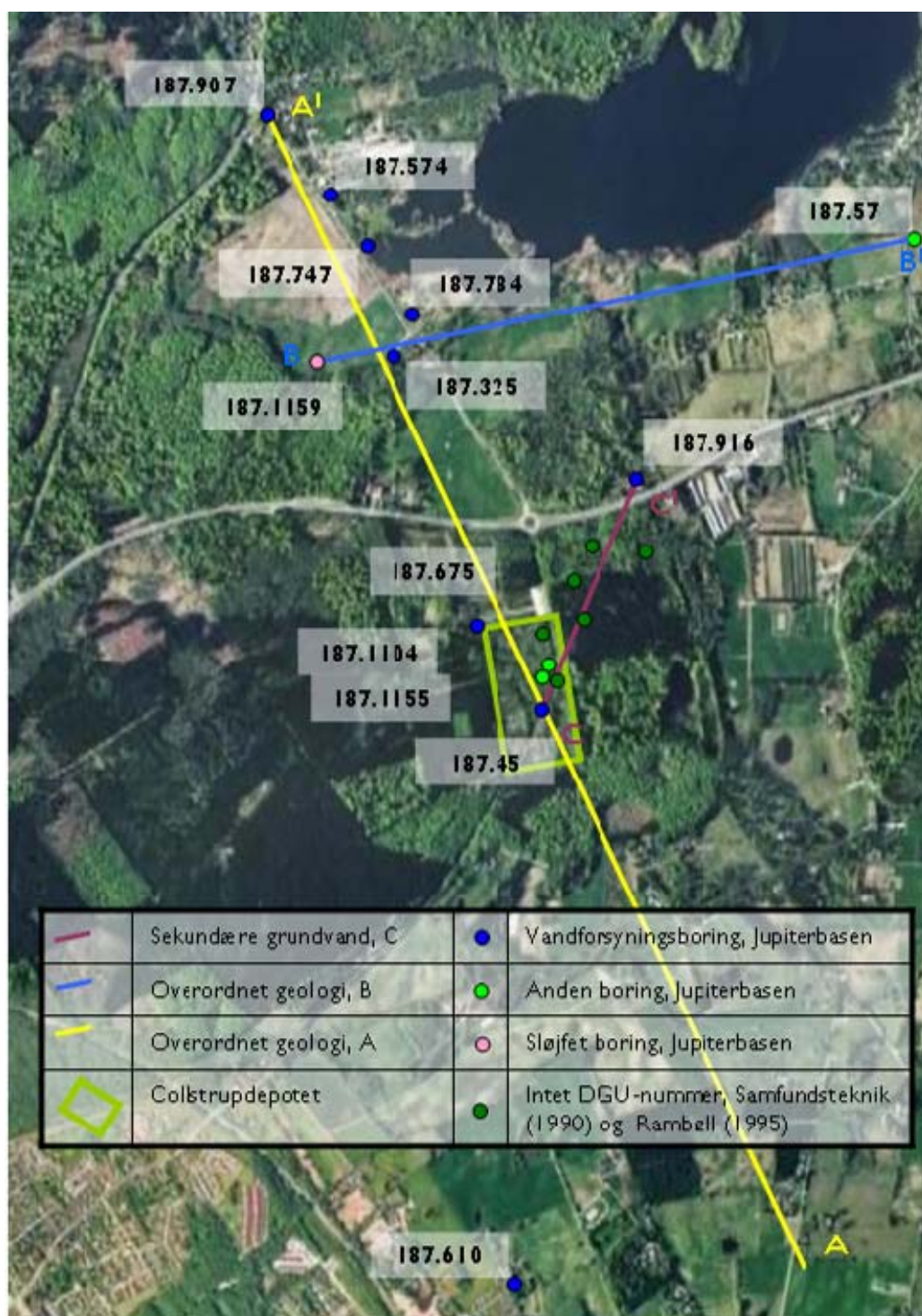
¹ Schuldt (1981) ² Konradi (1992)

4.1 Geologisk model

I forbindelse med udarbejdelsen af denne rapport er der fremstillet 3 geologiske tværsnit gennem området (se figur 4.2):

- **A** løber SØ-NV og viser den overordnede geologi og samtlige grundvandsmagasiner
- **B** løber V-Ø og viser de få dybere boringer der findes mellem Collstrupgrunden og Esrum sø
- **C** løber SV-NØ, og viser geologien og strømningsforholdene i det terrænnære og en del af det sekundære grundvandsmagasin

Tværsnittene er konstrueret på baggrund af oplysninger fra JUPITER-databasen og terrænnære boringer lavet i forbindelse med monitoringen af Collstrupgrunden (Samfundsteknik, 1990, Rambøll, 1996). Der findes ingen geofysiske data for området i GERDA-databasen (JUPITER og GERDA er databaser tilhørende GEUS, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelser, hvori der findes geologiske hhv. geofysiske data indsamlet i Danmark).



Figur 4.2: Placering af tværsnit A, B og C samt borerne brugt til konstruktion af tværsnittene.

4.1.1 Tværsnit A - Collstrupgrunden-Esrum Sø

Det SØ-NV gående tværsnit løber, som det ses af figur 4.3, på tværs af Esrumdalen og viser, at den højtliggende Collstrupgrund formentlig ligger på den del af kalken, der ligger højt. Udstrækningen og sammenhængen af den lerede serie (kote 0 - -40) er af stor betydning for hydrogeologien under Collstrup grunden, men der findes ikke data til at fastlægge den. I det højtliggende område omkring Collstrupgrunden er der kun en enkelt boring (187.675), der når ned til et lerlag i kote 0. Det kan ikke med sikkerhed afgøres, om det lerlag, der træffes i denne boring er moræneler (som

det tolkes af Samfundsteknik 1989a) eller den tilhører det lerlag af formentlig marin oprindelse, der overlejrer Esrumsandet. I det datagrundlag, der findes i JUPITER-databasen, er der ingen sikre observationer af lagfølgen under kote 0 i den sydlige del af profilet. Det er derfor ikke muligt at bestemme udstrækningen af lerlagene mellem den øvre og nedre sandede serie.

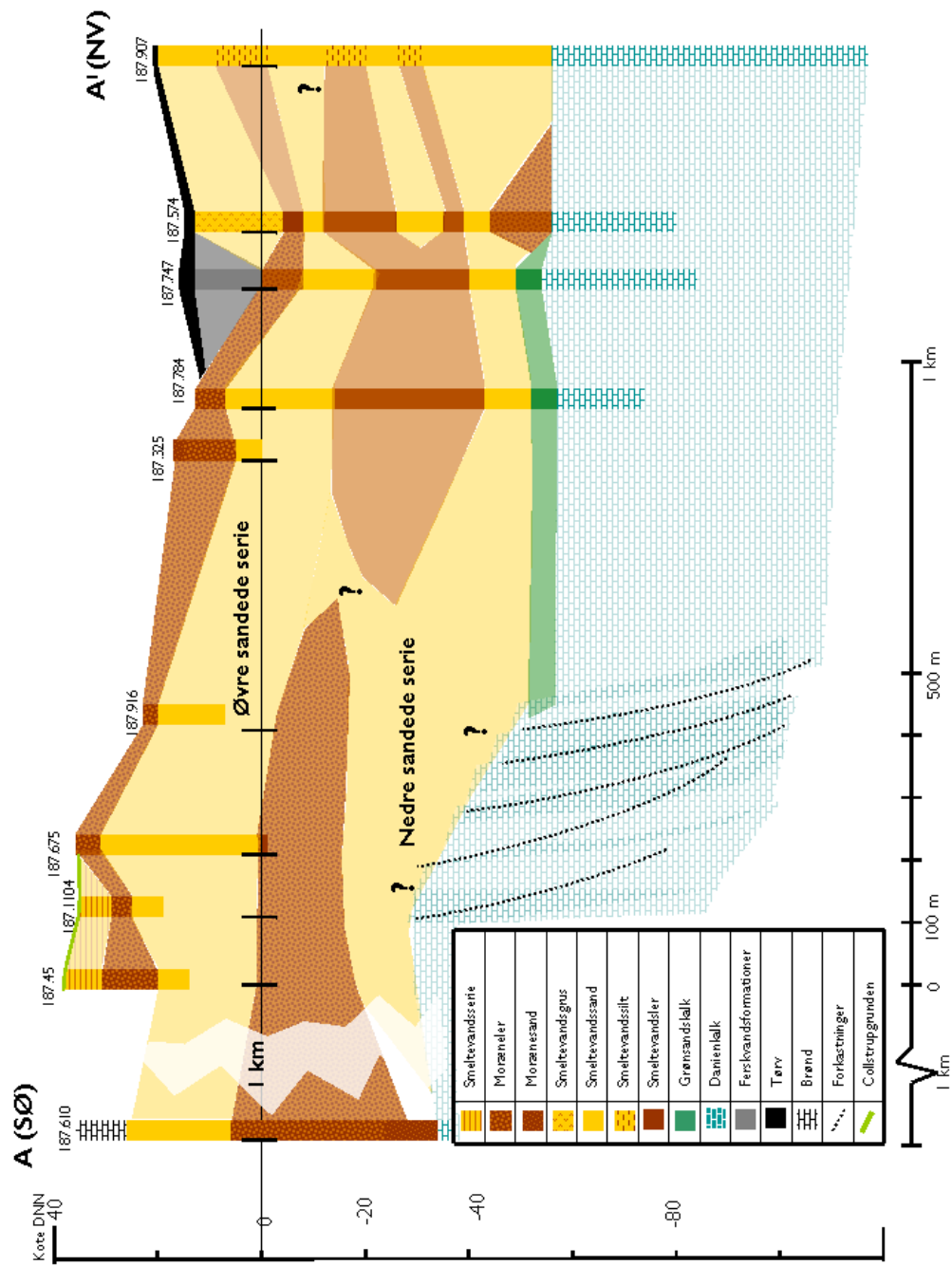
4.1.2 Tværsnit B – Parallelt med Hillerødvejen

Det V-Ø orienterede tværsnit (figur 4.4) indeholder kun få boringer, og der ses meget stor variation i lagfølgen over kort afstand i den vestlige del af tværsnittet. Under sidste istid, ved Gribskovfasen for 15.000-16.000 år siden løb en isrand langs med den vestlige kant af Esrum sø, hvilket har dannet et randmorænelandskab i Gribskov (Hansen, 1981). Mægtigheden af moræneaflejringerne i boring 187.1159 skyldes formentligt, at denne befinder sig lige på isranden.

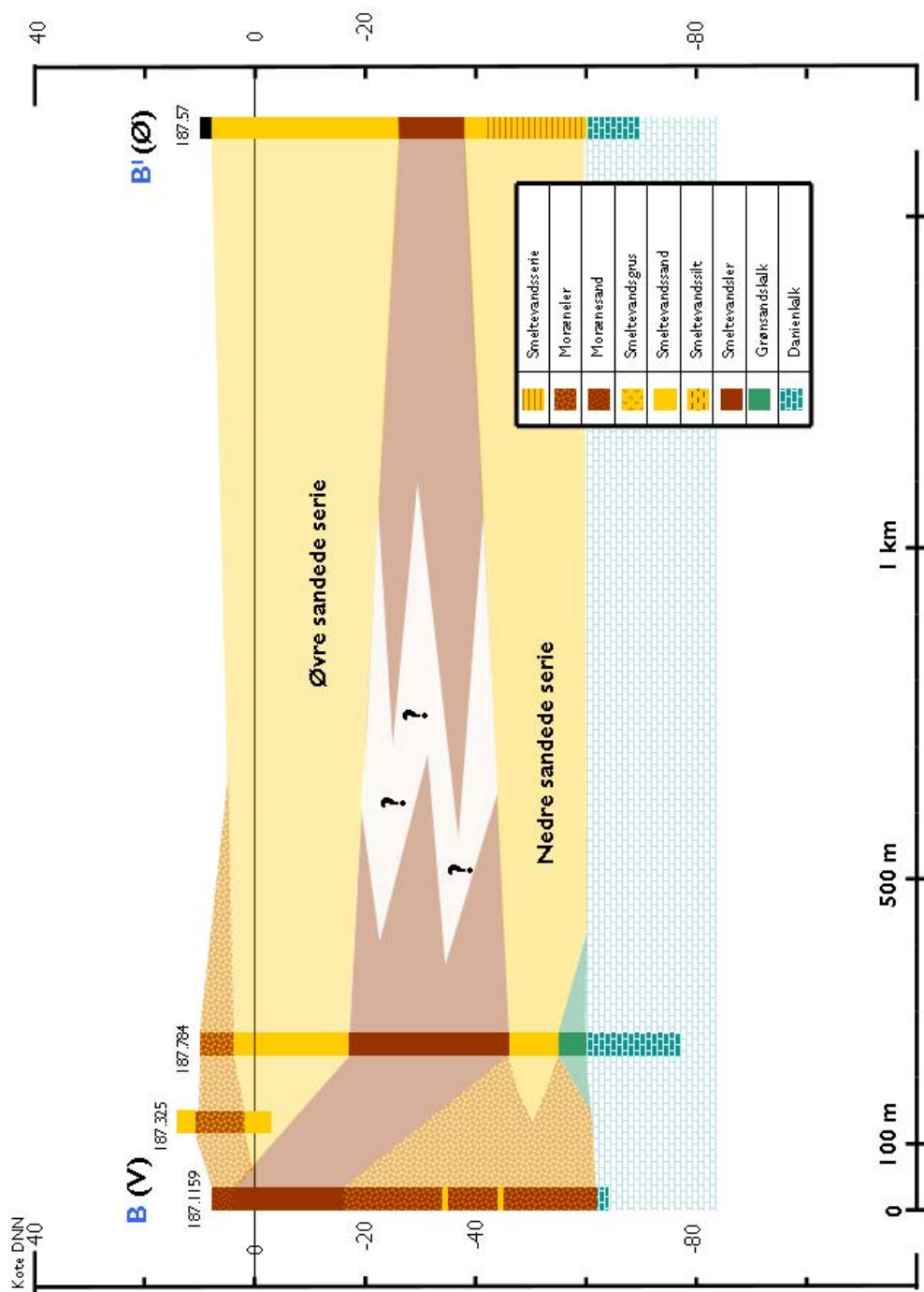
Fraværet af boringer i området, gør det vanskeligt at afgøre, om det er et kontinuert lerlag, der findes mellem det primære og sekundære grundvandsmagasin i boring 187.784 og 187.57.

4.1.3 Tværsnit C - Sekundære grundvandsmagasiner

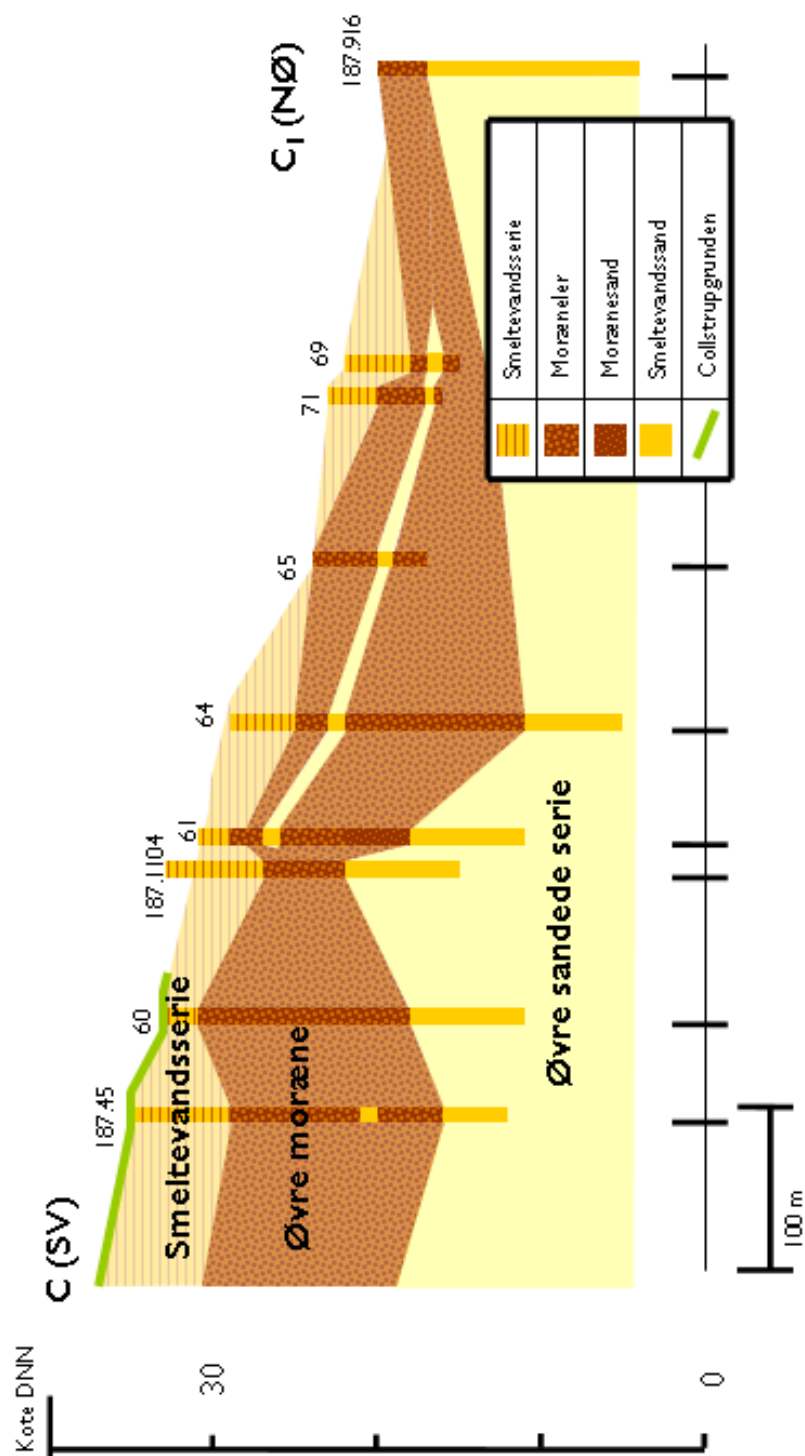
Tværsnittet (figur 4.5) giver et mere detaljeret indblik i strømningsforholdene for det terrænnære grundvand. Den øverste moræne indeholder flere sandlinser og i boring 61 er truffet stenbrolægninger (tynde lag af større sten, $\varnothing > 10$ cm), der må forventes at være vandførende. Det sandlag, der er truffet i boringerne 61, 64, 65, 71 og 69 tolkes at være sammenhængende og formentlig også vandførende. Der må altså forventes at være en vis vertikal strømning gennem morænen via disse sandlinser og stenbrolægninger.



Figur 4.3: Tværsnit A



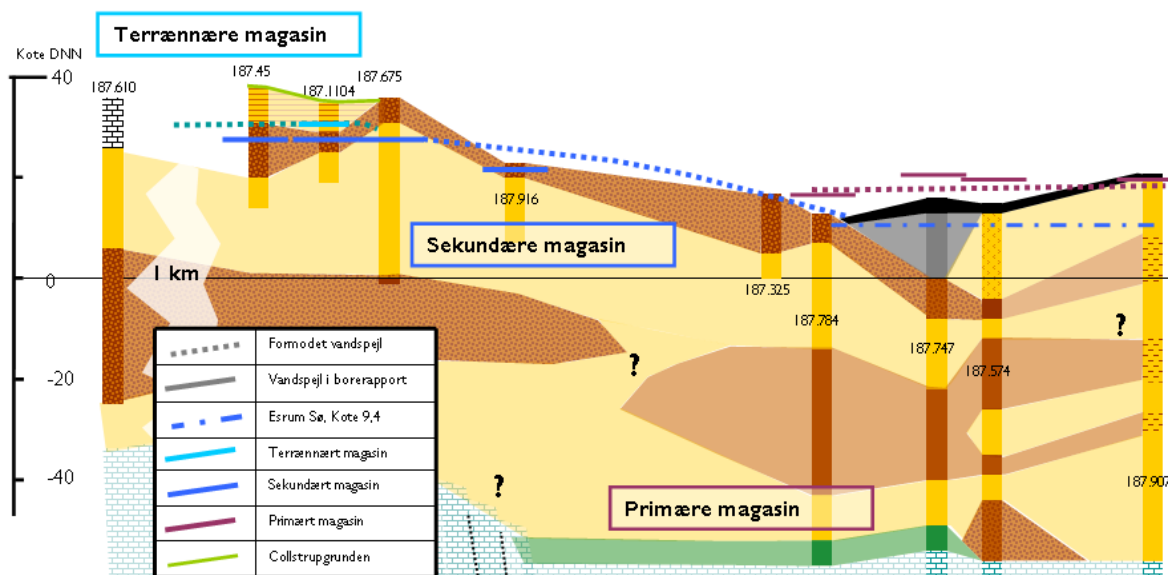
Figur 4.4: Tværsnit B



Figur 4.5: Tværsnit C. Boringerne 60-71 er miljøtekniske boringer etableret af Samfundsteknik (1990) og Rambøll (1996)

4.2 Strømningsforhold og grundvand

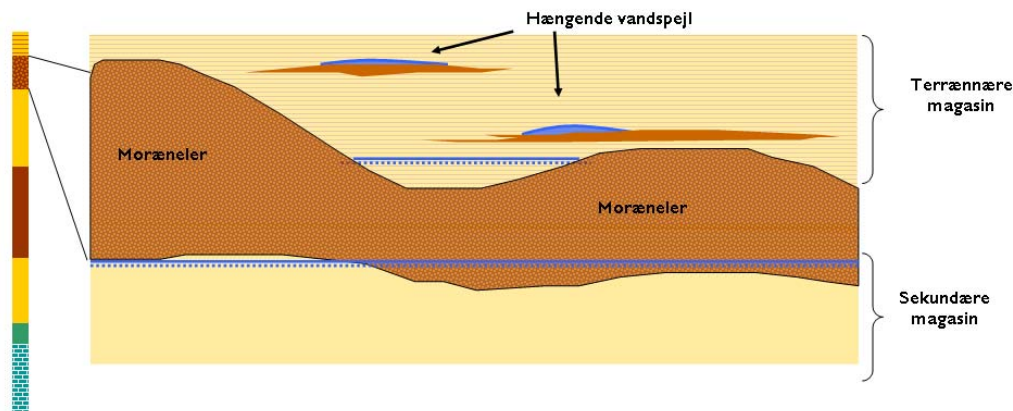
I området omkring Collstrupdepotet findes 3 grundvandsmagasiner, der er knyttet til hver sin geologiske formation. Magasinerne er i det følgende benævnt det terrænnære, det sekundære og det primære grundvandsmagasin (se tabel 4.1). Den overordnede grundvandsstrømning sker i nordøstlig retning mod Esrum Sø. I figur 4.6 ses et udsnit af det geologiske tværsnit A med indtegnede grundvandspotentialer. Potentialemålingerne stammer fra borerapporterne i Jupiterdatabasen, idet der ikke er lavet en samlet pejlerunde på alle magasiner samtidigt. Derfor er indtegnet et omtrentligt "gennemsnits"-grundvandsspejl for hvert magasin for at give en fornemmelse af de indbyrdes potentialeforskelle mellem magasinerne.



Figur 4.6: De 3 grundvandsmagasiner og potentialer indtegnet i tværsnit A. Geologiske signaturer findes i figur 4.3 (Pejledata fra Samfundsteknik 1989c samt Jupiterdatabasen).

4.2.1 Terrænnært grundvand

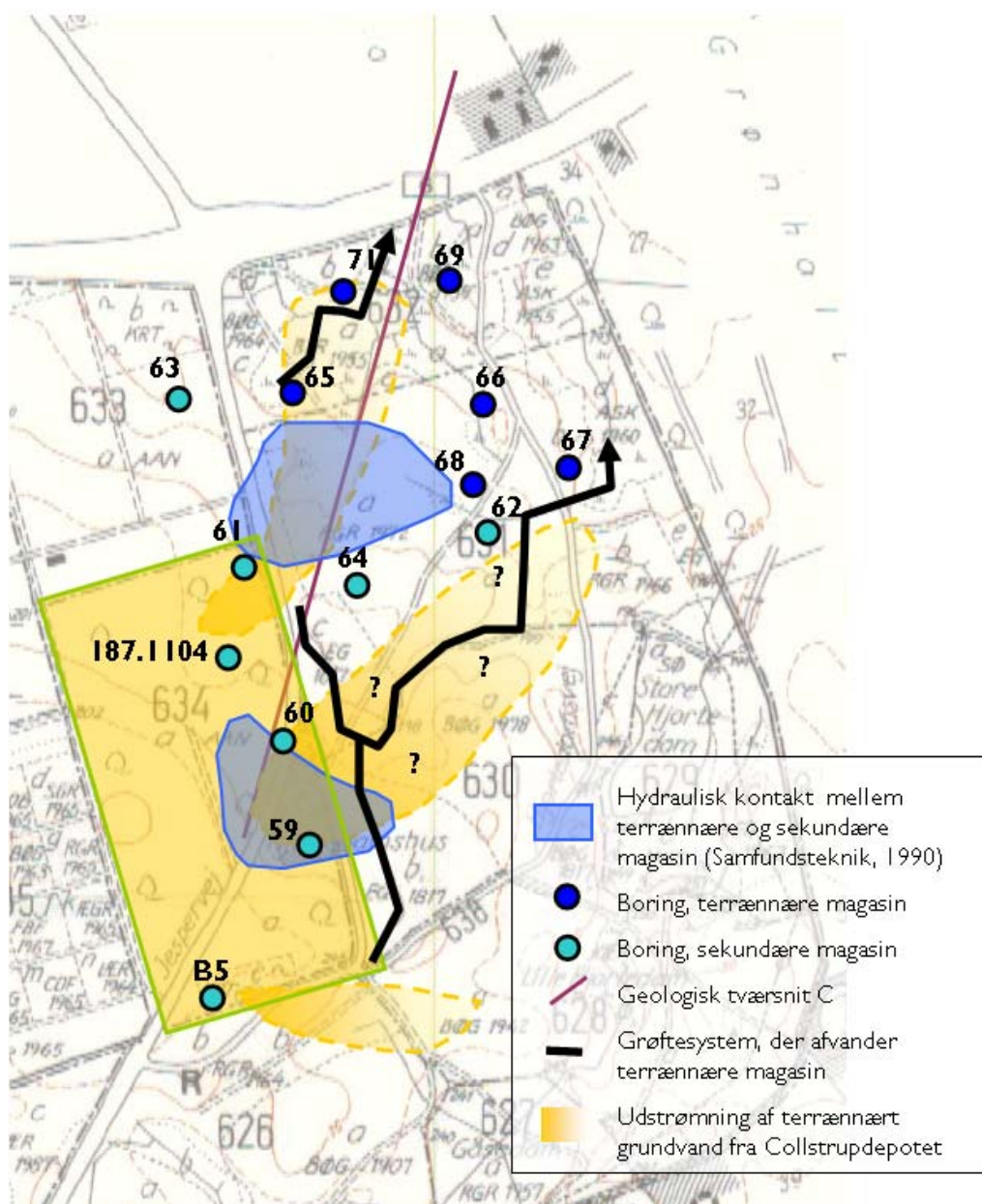
Inde på selve grunden er strømningsforholdene styret af den smeltevandsformation, der udgør de første 5 meter af lagserien på det meste af grunden. Denne består af vekslende ler og sandlag og medfører, at der på grunden findes adskillige **hængende vandspejl** oven på lerlagene. Det egentlige vandspejl findes i ca. 3 meters dybde. En konceptuel model af det terrænnære grundvand ses i figur 4.7.



Figur 4.7: Konceptuel model af det sekundære grundvand på Collstrupgrunden. Den overordnede geologiske lagfølge ses til venstre

Afstrømningsmønsteret af det terrænnære grundvand er styret af **morænelersoverfladen** af den øvre moræneaflejrings (jvnf. tabel 4.1). Lokale sænkninger i morænen virker som en tragt, der leder vandet ud af grunden mod øst og syd (se gul markering på figur 4.8). Moræneleren er samtidig næppe impermeabel, da der findes adskillige sandlinser og grovere indslag i morænen.

Det grundvand, der løber ud fra grundens nordøstlige hjørne, løber enten langs moræneoverfladen eller i sandlaget i morænen (se geologisk tværsnit C, figur 4.5). Vandet herfra opfanges formentligt i grøftesystemet. Der er 2 muligheder for det vand, der løber ud fra den østlige side af grunden, nemlig at det ender i grøftesystemet umiddelbart uden for grunden, eller at det trænger gennem moræneleren til det sekundære grundvand. Netop på dette sted er der observeret en lækage gennem moræneleren, som vist i figur 4.8. En prøvepumpning udført af Samfundsteknik (1990) viser, at der er hydraulisk kontakt mellem over og undersiden af moræneleren i de områder, der er vist med blå på figur 4.8. Kontakten er fundet ved at pumpe vand op fra det sekundære magasin i en boring inde på grunden og derefter måle sænkningen i det terrænnære grundvand. Der er et vist sammenfald mellem disse sænkninger i morænefladen og **hydraulisk kontakt mellem det terrænnære og sekundære grundvand**. Af det geologiske tværsnit C er det ikke åbenlyst, at der er hydraulisk kontakt, men områderne er dog nogenlunde sammenfaldende med det sted hvor moræneleren er tyndest (ca. 5 meter). Der er ikke lavet en kvantificering af strømmingen gennem moræneleren og det vides ikke om der sker forureningstransport derigennem.



Figur 4.8: Den forventede afstrømning af forurenet grundvand, samt områder med hydraulisk kontakt gennem moræneleren. Strømningsdata fra Samfundsteknik (1989b)

4.2.2 Sekundære grundvandsmagasin

Som tidligere beskrevet, er det ikke undersøgt, hvor stor en del af det terrænnære grundvand, der nedsiver til det sekundære grundvandsmagasin. Der blev i 1990 lavet to pejlerunder i magasinet, både i de miljøtekniske borer i skoven og i vandforsyningsboringerne ved Porthus og Hjortedamshuset. Disse viste en strømningsretning der løber mod øst ud af grunden og drejer nordpå mod bredden af Esrum Sø, lige nord for Søgård (se figur 4.9). Gradienten i det sekundære grundvand var da ca. 8 ‰, hvilket giver en grundvandshastighed på ca. 350 m/år (Samfundsteknik, 1990).



Figur 4.9: Aktive indvindingsboringer på Stenholt Vandværk og hvilke magasiner de indvinder fra (Hillerød Kommune, 2003).

Som det ses af figur 4.6, hersker der nord for Hillerødvejen udpræget artesiske forhold. Dette ses i terrænet som den sumpede skovbund og de helårsvandførende grøfter. Det er vandet fra det sekundære grundvandsmagasin, der strømmer op her.

Det er usikkert om de lerlag, der ligger mellem den øvre og nedre sandede serie (dvs. mellem det sekundære og primære magasin), er gennemgående i området. (se tværsnit A i figur 4.3). Der findes heller ingen pejledata fra området nord for Hillerødvejen. Der er derfor usikkert, i hvor høj grad der forekommer en vertikal grundvandsstrømning mellem det sekundære og det primære grundvandsmagasin. Det er også uvist om grundvandsstrømningen i givet fald er opad- eller nedadrettet mellem de to magasiner.

4.2.3 Primære grundvandsmagasin

Det primære magasin udgøres af Alnarpdalens formationer, dvs. Esrumsandet (den nedre sandede serie) og Danienkalk. Esrumsandet er det største sammenhængende grundvandsmagasin i Nordsjælland og udover Stenholt Vandværk indvinder bl.a. Langstrup og Nødebo vandværker fra denne formation. Disse vandværker ligger dog ikke nedstrøms Collstrupdepotet.

Indvindingsboringerne fra Stenholt Vandværk står ved den sydvestlige ende af Esrum Sø. I figur 4.9 ses de aktive boringer og hvilke magasiner, de indvinder fra. Boringerne står ca. 800 – 2.000 meter nord-vest for Collstrupdepotet. I boringerne ved Stenholt Vandværk står trykniveauet 4-5 meter over terræn. Vandværket har en

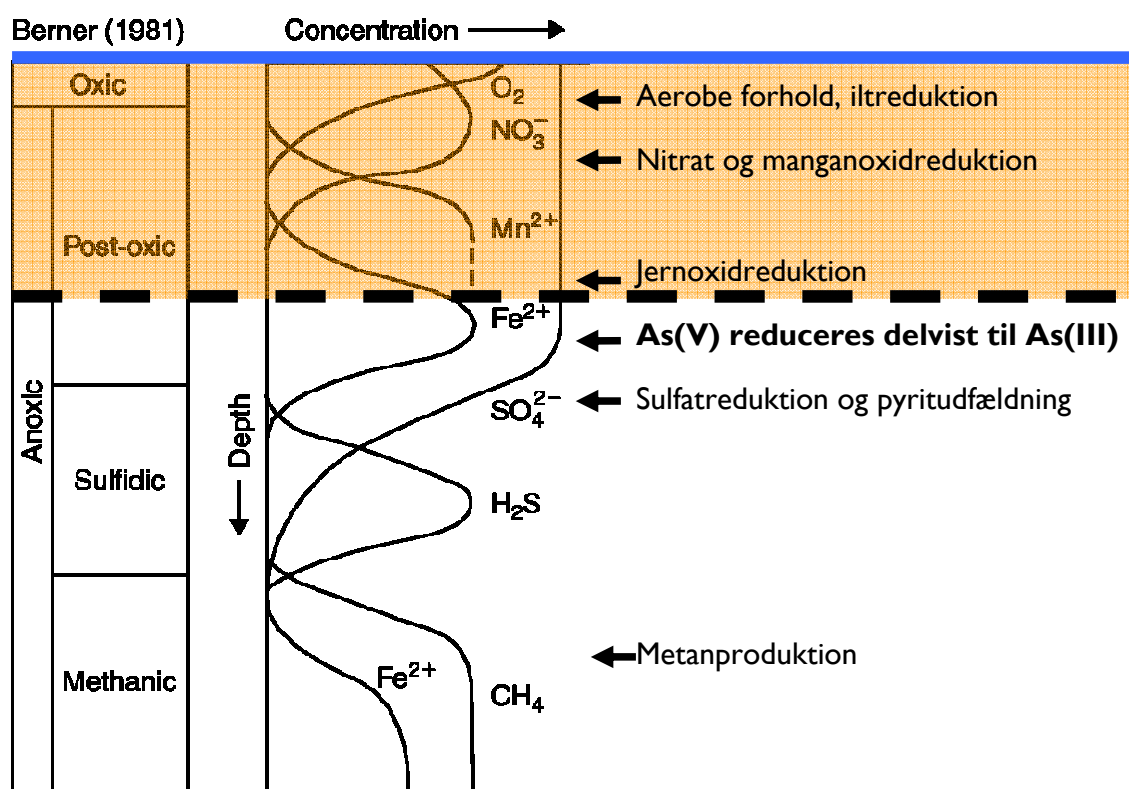
indvindingstilladelse til 500.000 m³ og indvandt 446.700 m³ i 2008 (Jupiterdatabasen, 2009).

Det fremgår af figur 4.9, at Collstrup-grunden ligger umiddelbart udenfor OSD-området, hvis afgrænsning er defineret af vandværkets indvindingsopland. På baggrund af det nyeste potentialekort for det primære magasin (Region Hovedstaden, 2008) ser det ud til at vandet fra Collstrupgrunden snarere strømmer under Esrum Sø end mod Stenholt Vandværk. I det pågældende område er der dog ikke mange nyere pejlinger, hvilket gør det vanskeligt at fastlægge en detaljeret strømningsretning.

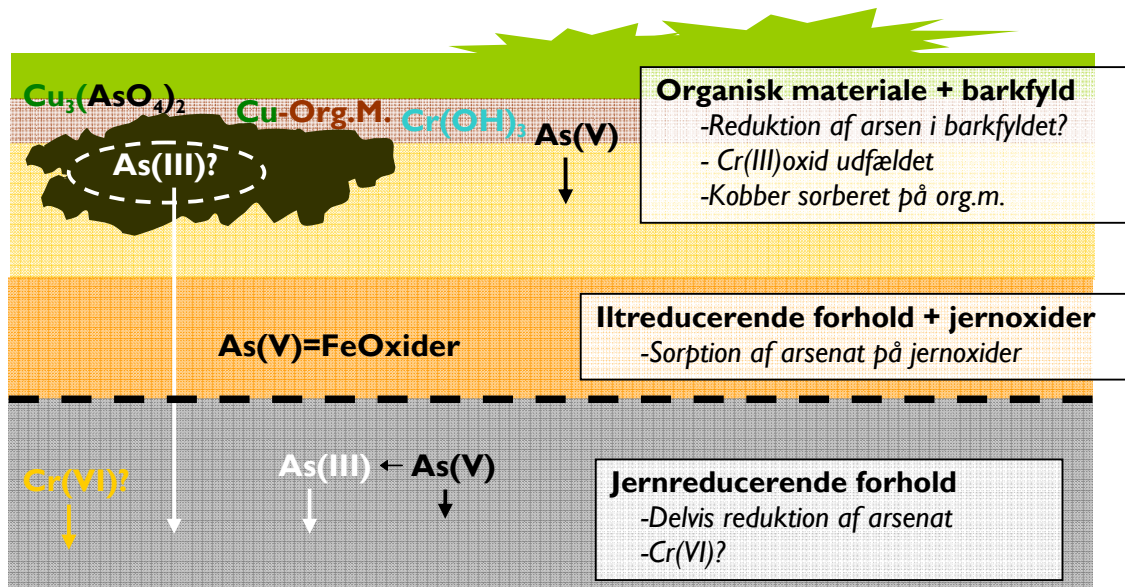
4.3 Geokemiske forhold

Som beskrevet i kapitel 3.2 er der stor forskel på mobiliteten og toksiciteten af de forskellige kemiske tilstandsformer af arsen og krom. Disse kemiske tilstandsformer er bestemt af pH- og redoxforholdene i jorden og grundvandet.

Redoxforholdene afhænger af hvilken oxidant, der er til stede i jord og grundvand. I figur 4.10 ses en skematisk oversigt over de forskellige redoxzoner i et grundvandsprofil. Da området på og omkring Collstrupgrunden er udlagt som skov vil nitrat - i modsætning til et landbrugsområde - ikke være til stede i betydelige mængder. Når ilten er brugt op, vil det altså være jernreduktion, der går i gang. Jernreduktionen ses tydeligt som et farveskift i sedimentet fra rødbrun til grå.



Figur 4.10: Redoxzonerne i et grundvandsprofil. Redox-grænsen er markeret med en stiptet, sort linje og grundvandsspejlet med en blå. (Berner, 1981 i Appelo og Postma, 2005)

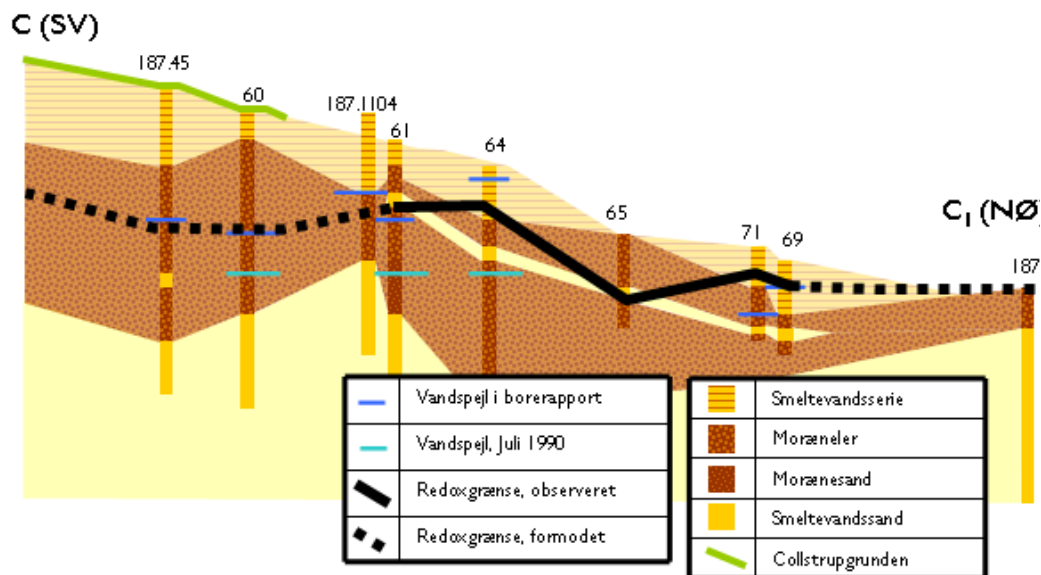


Figur 4.11: Skematisk tegning af jordprofil med placeringen af de forskellige kemiske specier. Pilene markerer mobile specier

På trods af de mange undersøgelser, der er lavet på Collstrupdepotet, er der næsten ingen informationer om redoxforholdene på grunden og i det terrænnære og sekundære grundvand. Den eneste information, der findes om geokemien i den sekundære grundvand, er en omtrentlig placering af **redoxgrænsen** på baggrund af farveskift i sedimentet observeret i boreprofilerne fra Jupiterdatabasen og monitoringsboringerne, Samfundsteknik (1990) og Rambøll (1996).

Redox grænsen er indtegnet i tværsnit C i figur 4.12 herunder. Redoxgrænsen under Collstrupdepotet ligger i ca. 10 meters dybde, mens den i området nord for grunden ligger noget højere, i 1-2 meters dybde. Længere mod nord i det artesisk prægede område vil redoxzonen være at finde i jordoverfladen. Her strømmer anoxisk vand ud i grøfter og moseområder, hvilket ses af okkerforekomsten.

Så snart arsen findes i reducerede miljøer vil en del være reduceret til **arsenit**. Det er umuligt at forudsige, hvor stor andelen af arsenit vil være i det sekundære grundvandsmagasin nedstrøms Collstrupgrunden uden direkte målinger. Da smeltevandsformationen på Collstrupgrunden visse steder er leret, vil der i våde perioder opstå "hængende vandspejl", der sammen med det organiske materiale kan skabe lokale reducerede zoner over det egentlige grundvandsspejl (illustreret fysisk i figur 4.7 og kemisk i figur 4.11). Det betyder, at der formentlig findes arsenit allerede i under en meters dybde. Det primære magasin i Alnarpdalen er stærkt reduceret, idet der er fundet op mod 40 mg/L methan i indvindingsboringerne 187.747 og 187.784 (Jupiter, 2009). Under sådanne redoxforhold vil langt størstedelen af eventuelt tilstedeværende arsen være arsenit.



Figur 4.12: Redoxgrænse og vandspejl i tværsnit C

4.3.1 Målinger af specieringen af forureningskomponenterne

Mobiliteten i grundvand og økotoksiciteten afhænger i høj grad af specieringen af arsen og krom. Arsenit, As(III) og kromat Cr(VI) er de mest toksiske (se tabel 3.2).

Der er aldrig målt på de specifikke redoxfølsomme specier, f.eks As(III)/As(V) eller Cr(III)/Cr(VI), men kun på totalconcentrationer. Derfor er det umuligt med sikkerhed at afgøre hvilken speciering metallerne i jord og grundvand har, og om redoxforholdene er, som man må forvente (jvnf. foregående afsnit)

Der er kun lavet en enkelt undersøgelse af redoxpotentiale og total vandkemi (AVJ, 2000). Denne undersøgelse baserer sig på målinger af 2 vandprøver, begge fra boreriger på grunden og filtersat i hhv 1-1,6 og 3-4 meters dybde. Målinger af redoxpotentiale er dog særdeles usikre og vil sjældent give en retvisende arsenspeciering. Der er alligevel lavet en specieringsberegning på vandprøven fra 3-4 meters dybde ved brug af den målte vandkemi og redoxpotentialet. Denne viste, at **den dominerende specie i grundvandet er arsenit**, der potentielt udgør 2/3, mens resten er arsenat.

4.3.2 Mobiliteten af forureningskomponenterne på Collstrupgrunden

Mobiliteten af opløst arsen i naturlige systemer er almindeligvis knyttet til **jern- og aluminiumoxider**. Jorden på Collstrupdepotet indeholder kun få procent jernoxider (Nielsen, 2008) og vil derfor ikke kunne tilbageholde væsentlige mængder arsen. Det betyder umiddelbart, at mobiliteten på grunden er meget høj, også sammenlignet med andre arsen- og CCA-forureninger (Nielsen, 2007). Arsen kan desuden transporteres på **kolloider** af jern og aluminiums-oxider, men undersøgelserne fra AVJ (2000) viste at kun en begrænset fraktion (hhv. 6% og 16 % i de 2 vandprøver) er kolloidt bundet.

VKI (1994) har lavet **udvaskningstest** af 3 letforurenede jordprøver fra depotet med et arsenindhold på hhv 200, 6 og 120 mg/kg. Resultatet af udvaskningstesten er behæftet med så mange forbehold, at det er svært at overføre til vurderinger om mobiliteten. Der blev ikke observeret forskel i arsenudvaskning på aerobe og anaerobe prøver, hvilket igen tyder på, at det ikke er jernoxider, der er afgørende for mobiliteten af arsen på depotet.

I porevandsmålinger fra den umættede zone er målt op til 60 mg/L arsen (Nielsen, 2007). Dette er langt over ligevægtskoncentrationen for flere arsenatforbindelser, og betyder, at arsen i jorden må være reduceret til arsenit. Med så høje arsenkoncentrationer, vil der forekomme forskellige **udfældninger af arsenholdige mineraler**. Dette ses bl.a. på de grønne kobber- eller kromarsenatbelagte sten, der nemt kan findes i de mest forurenede områder på grunden.

Nielsen (2007) har på baggrund af de omtalte porevandsmålinger og målte arsenkoncentrationer i jorden estimeret sorptions-konstanten, K_d , for arsen i de terrænnære jordlag på Collstrup-grunden (se tabel 4.2). K_d værdierne ligger en del lavere end observeret i laboratorieforsøg, hvor K_d i oxideret sediment var mellem 83 og 1875 L/kg, mens de for reducerede forhold var en faktor 10 mindre (Miljøstyrelsen, 1996). Arsenforureningen i jordprofilet er altså ret mobil, hvilket nok skyldes tilstedeværelsen af barkmaterialet, der dels giver de ekstremt høje koncentrationer, dels leverer organisk materiale til reducerede forhold. Med K_d værdi mellem 1 og 60 vil **retardationsfaktoren for arsen være i størrelsesordenen 10-500**¹. Retardationsfaktoren er den forsinkelse hvormed arsenfronten vil bevæge sig i forhold til grundvandet.

Dybde [cm under terræn]	K_d [L/kg] gennemsnit	K_d [L/kg] Lavest-højest
30	22	12-60
60	11	10-13
90	2	1-2
120	18	6-33
Tabel 4.2 Målte K_d -værdier for arsen på Collstrupdepotet (Nielsen, 2007)		

Kobber og krom findes overvejende i den øvre del af jordprofilet associeret med det organiske materiale (DGU, 1977 og Samfundsteknik, 1989b). Som det ses af figur 4.11 forventes krom i jordprofilet at være udfældet som $\text{Cr}(\text{OH})_3$, og kobber at være sorberet til det organiske materiale i jorden. Mobiliteten af $\text{Cr}(\text{III})$ og Cu i jorden forventes derfor at være lav. Det er muligt, at der i driftsperioden kan være sket spild af **$\text{Cr}(\text{VI})$** , som ikke er blevet reduceret til $\text{Cr}(\text{III})$ i jorden. Dette giver mulighed for, at der findes den toksiske og mobile form $\text{Cr}(\text{VI})$ i grundvandet. I de få målinger, der er lavet af grundvandet, er der dog ikke fundet krom og kobber i de seneste målinger (se kapitel 5 og tabel 5.2).

¹ $R = \frac{\delta_b}{\phi} K_d$, hvor massefyllden antages at være 2,65 kg/m³ og porøsiteten 0.3

5 Forureningsudbredelse

5.1 Jordforurening

Forureningen med imprægneringsmidlerne er sket under håndteringen og ved spild samt fra utætte kar (Samfundsteknik 1989a). Det er især på afdrypningspladserne og ved imprægneringskarrene, der er sket omfattende jordforurening (Samfundsteknik 1989b). I tabel 5.1 ses en oversigt over koncentrationsniveauerne og den vertikale udbredelse af de forskellige forureningskomponenter.

	Typisk konc. i jord [mg/kg]	Konc. i barkfyld [mg/kg]	Est. masse [tons]	Vertikal udbredelse
Arsen	2-1000	130-21000	35 ¹ 44 ²	I grundvand, over 100 mg/kg i jord ned til 4 meter under terræn
Krom	4-700	390-34000	5 ²	Langt størstedelen i øverste 50 cm af jorden
Kobber	6-1500	~7000	7 ²	Størstedelen i øverste 50 cm af jorden, enkelt sted ned til 4 m. u. t.
Flourid	Op til 4700 ³	i.m.	Ikke opgjort	Ikke undersøgt
Diesel	200 i hotspot	i.m.	Mindst 1200 L	Ned til lerlag 2,5 m. u. t.
Tjære	2	i.m.	Ikke opgjort	Ned til 3 meter
Dinitrophenol	Kun grundvand	i.m.	Ikke opgjort	I grundvand

Tabel 5.1: Forureningskomponenternes udbredelse i jord. Data fra Samfundsteknik 1989b, medmindre andet nævnt. i.m. – ikke målt ¹Samfundsteknik (1990) ²Pedersen (2007) ³Samfundsteknik (1991b)

Der findes **4 hotspots** på grunden, som ikke er rensat op. Det drejer sig om følgende områder, der er udpeget af Samfundsteknik (1989b) og hvis placering fremgår af figur 2.1:

- Nordlige imprægneringskar (markeret "imp. bygn." i figur 2.1)
- Området ved den tidligere imprægneringsbygning med imprægneringskar. Her er der også en tjæreforurening
- Området ved den tidligere forsøgsbygning med imprægneringskar og mandskabsbygning
- Dieselforureningen, der antages at have udgjort 1200 L dieselolie.

Imprægneringskarrene indeholder i følge Samfundsteknik (1989b) imprægneringsslam, der har et tungmetallindhold på op mod 50 % samt bygningsaffald og metalskrot. Ved opgravningen af fyldpladsen i 1990 blev det mest forurenede materiale sendt til kommunekemi, men 2000 tons forurenede jord og barkaffald blev deponeret i den sydlige del af grunden (Samfundsteknik, 1992). Dette depot findes formentlig stadig.

Derudover findes der omfattende, men mere diffus forurening på afdrypningspladserne (se figur 2.1). I de mest forurenede områder findes grønne sten, der er udfældninger af **kobber- eller kromarsenat**, enten i rene, slamagtige klumper eller som udfældninger på betonstykker fra imprægneringsbassinerne. Samtidig er store mængder imprægneret bark brugt som opfyld og udlagt i et stort område i den nordvestlige del af grunden. Barkfyldet stammer fra Boucherie-imprægnerede træstammer, der først blev afbarket efter imprægnering. Barken blev

opbevaret på pladsen og i driftsperioden brugt som stabiliserende fyld i de sumpede områder af pladsen (Samfundsteknik, 1989a). En væsentlig del af metallerne findes i **barkfyldet**, der indeholder adskillige % tungmetaller. Udbredelsen af barkfyldet er vist på figur 2.1 og typiske koncentrationer i barkfyldet er vist i tabel 5.1.

Mængden af forurenede jord med en arsenkoncentration på over 40 mg/kg anslås at være over **82.000 m³**, hvoraf 60.000 m³ er overfladejord fra den øverste meter. De 82.000 m³ indeholder ca. 27 tons arsen, hvilket er 2/3 af den samlede masse og en fjernelse heraf vil reducere mængden af kobber og krom til "ubetydelige niveauer", der ikke er nærmere definerede i rapporten. I alt anslås **280.000 m³** jord at være forurenede (Samfundsteknik, 1990).

I de følgende afsnit gennemgås arsen, krom og kobber enkeltvis. Resultaterne er summeret i tabel 5.1.

5.1.1 Arsen

I forhold til afskærings- og jordkvalitetskriterierne er arsen det mest problematiske stof på Collstrupgrunden, idet begge kriterier er lave, nemlig 20 mg/kg (Miljøstyrelsen, 2009).

85-90% af jorden i de øverste 100 cm indeholder over 40 mg/kg arsen (Samfundsteknik, 1990). Jordprøver med **arsenkoncentrationer på op mod 2000 mg/kg** er ikke ualmindelige, også uden for de 4 hotspots (Nielsen, 2007 og Samfundsteknik 1989b). I området omkring den sydlige imprægneringsbygning findes arsenforurening i jorden på over 100 mg/kg i 3-4 meters dybde.

5.1.2 Krom

Afskæringskriteriet for krom er 1000 mg/kg, mens jordkvalitetskriteriet er 500 mg/kg. Hvis krom optræder som Cr(VI) gælder der kun et jordkvalitetskriterie på 20 mg/kg.

På Collstrupgrunden er kromkoncentrationerne almindeligvis 100-200 mg/kg og kun enkelte steder over 500 mg/kg. Der er aldrig målt på specieringen af krom, så det vides ikke med sikkerhed hvilken specie, der optræder på grunden, men det er formentlig Cr(III). I jord med organisk materiale vil Cr(VI) normalt reduceres til det immobile Cr(III). **Kromforureningen er stort set udelukkende at finde i den øverste halve meter** (Samfundsteknik, 1989b), og mere deltalejrede undersøgelser viser, at den nærmere befinder sig i de øverste 30 cm (Nielsen, 2007 og DGU, 1977). Dette tyder igen på, at krom er bundet som Cr(III) i jorden, idet der ikke er sket udvaskning til dybere jordlag.

5.1.3 Kobber

Afskæringskriteriet for kobber er 1000 mg/kg, mens jordkvalitetskriteriet er 500 mg/kg.

I forhold til kobberforureningen er det let at identificere hotspots, idet kobber især er giftigt for planter, og hotspots derfor vil være steder med udpræget misvækst. Kobberforureningen er koncentreret omkring to felter i den vestlige del af grunden, der i dag er tydeligt ses i terrænet, da bevoksningen her udelukkende er mos. Det ene er vest for forsøgsbygningen, hvor der har foregået **Boucherie-imprægnering**

(se figur 2.1) og det andet et tidligere afdrypningsareal syd for den tidligere bestyrerbolig. Her er koncentrationen over 250 mg/kg. Det er også i Boucheriefeltet, der er fundet forhøjede kobberkoncentrationer (op til 400 mg/kg) ned til 4 meters dybde (Samfundsteknik, 1989b). Dette skyldes sandsynligvis omfattende spild af imprægneringsvæske. Massen af kobber i dette område anslås at være 2-4 tons (Samfundsteknik, 1990).

5.2 Grundvand

I tabel 5.2 er vist en sammenstilling af målinger fra de tre grundvandmagasiner. Det ses af tabel 5.2, at forureningen især er konstateret inde på grunden i de terrænnære magasiner og kun i meget lille grad i det sekundære magasin. Målingerne fra den første forureningsundersøgelse tyder på, at de mobile puljer af krom og kobber er udvasket fra jorden, da koncentrationerne er faldet markant fra 1977 til 1989.

I forbindelse med monitoreringen af grunden, er der installeret en række miljøtekniske borer i skoven nordøst for grunden. Enkelte af disse når ned i det sekundære magasin (boring 60-64), mens de fjerneste (boring 65-71) kun er filtersat i det øvre moræneler (se figur 4.8 og figur 5.1) og derfor er medtaget i tabel 5.2 som terrænnære.

Magasin	På Collstrupgrunden		Nedstrøms grunden		
Terrænnært	1977 ¹	1989 ²	1995 ⁶		2000 ⁷
As	20-9200	50-32000	<0,2*-2,7 (15-200 i ufilt.)		<0,2*-4,3
Cr	21-1500	4-225 (330 i impr. kar)	<3*-3 (120-1000 i ufilt.)		<10*-10*
Cu	23-1740	2-96 (320 i impr. kar)	<3* (130-930 i ufilt.)		<10*-20*
Fluorid	i.m.	30000-90000 ⁴	i.m.		160*-280
Diesel	i.m.	73000 ⁵	8,2		i.m.
Naphtalen	i.m.	35-6100	i.m.		i.m.
Dinitrophenol	i.m.	0,8	i.m.		i.m.
Sekundært	1977 ¹	1990 ³	1990 ³	1995 ⁶	2000 ⁷
As	<2*-11	<0,2*-1,8	<0,2*-0,8	<0,2*	<0,2*
Cr	<5-183	<3*	<3*	<2*	i.m.
Cu	<10-20	i.m.	i.m.	<3*	i.m.
Fluorid	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.	180*-210
Kulbrinter	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.
Primært			Stenholt Vandværks råvand,, 2009 ⁸		
As	Ingen målinger		0,064*		
Cr			i.m.		
Cu			i.m.		
Fluorid			1700*		

Tabel 5.2 Målinger af forureningsstoffer i grundvand [µg/L]

*På niveau med baggrundsværdier ¹DGU (1977) ²Samfundsteknik (1989b) ³Samfundsteknik (1990)

⁴Samfundsteknik (1991b) ⁵Samfundsteknik (1989c) ⁶Rambøll (1996) ⁷Niras (2000) ⁸Jupiterdatabasen, boring 187.784

5.2.1 Det terrænnære grundvand

Målinger fra forureningsundersøgelsen i 1989 og 1990 viser, at det terrænnære grundvand i vid udstrækning er forurenet med arsen, også i koncentrationer der overstiger ligevægtskoncentrationen for almindelig arsenholdige mineraler (se kapitel 4.3.2). Krom og kobber findes ikke i tilsvarende omfang i grundvandet, men der ses forhøjede koncentrationer (~300 µg/L) omkring og i imprægneringskarrene. De organiske forureninger findes især i det terrænnære grundvand. I tjære og diesel hotspot'ene (se figur 2.1) er målt hhv. 6100 µg/L naftalen og 73000 µg/L dieselolie (Samfundsteknik 1989b). Derudover er der fundet 2,4-Dinitrophenol i en boring inde

på grunden, men kun 0,8 µg/L (Samfundsteknik, 1989b). Ved efterfølgende monitorering er der fundet kulbrinter (formentlig fra dieselforureningen) i boring 65 100 meter nord for grundens nordøstlige hjørne (Rambøll, 1995).

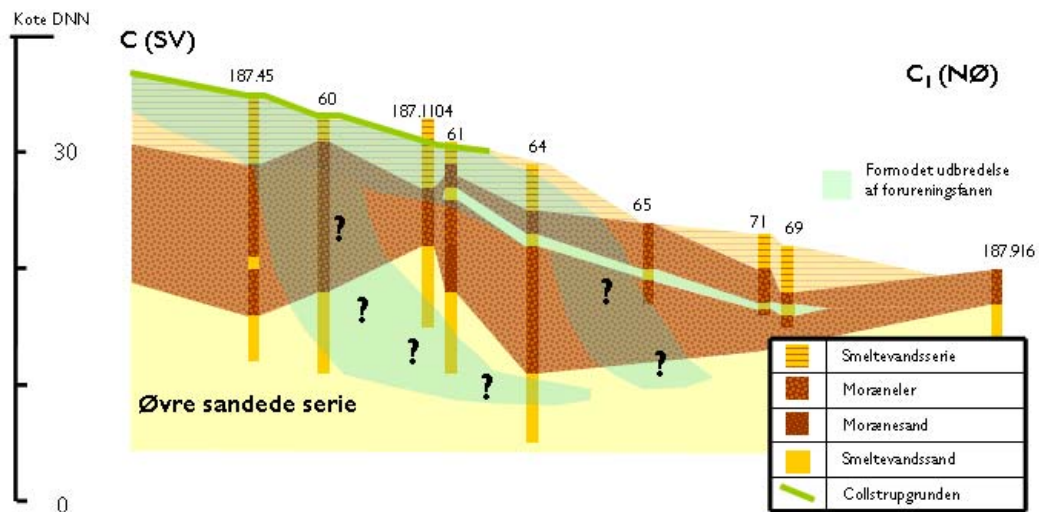
Rambøll installerede i 1995 en række boringer (nr 67-71) med det formål at kortlægge udbredelsen af arsenforureningen i den øvre moræne og smeltevands-serien. I den forbindelse blev der lavet en monitoringsrunde på samtlige boringer i skoven nordøst for grunden (boring 61-71). Der var i monitoringsrunden problemer med lavtydende boringer, hvilket må forventes i boringer filtersat i moræneler. Da man havde problemer med at udtage et tilstrækkeligt volumen, blev vandprøverne ikke filtreret og man fandt **15-200 µg/L As, 120-1000 µg/L Cr og 130-930 µg/L Cu** (Rambøll, 1995). Der blev ikke fundet en forklaring på de høje koncentrationer i denne monitoringsrunde, men det er muligt, at de høje koncentrationer skyldes kolloidtransport. Da arsen primært vil sorbere på jernoxider og kobber primært organisk materiale vil det kræve, at begge typer kolloider var til stede på prøvetagningstidspunktet.

Efterfølgende har Niras gennemført en monitoringsrunde af det sekundære grundvand. Der blev kun fundet arsen i den øvre del af **boring 71 og kun i en lav koncentration på 4 µg/L** (Niras, 2000). Der kan dog yderligere være forureningspåvirkning ved boring 69, idet der her er målt 0,9 µg/L, der er højere end baggrundsniveauet på ca. 0,2 µg/L. Det er umuligt at vurdere forureningsfanens størrelse i det terrænnære magasin, da der som sagt kun er fundet tydelige tegn på arsen i boring 71.

5.2.2 Det sekundære grundvand

Med den utæthed i morænen, der er fundet belæg for i prøvepumpningerne (Samfundsteknik, 1990) er det muligt, at der sker nedsivning til det sekundære magasin som vist i figur 5.1. I samtlige monitoringsrunder er der dog ikke fundet forhøjede arsenkoncentrationer i nogen af de boring nedstrøms grunden, der er filtersat i det sekundære magasin (se tabel 5.2).

Samfundsteknik (1989b og 1990) etablerede 7 boringer til det sekundære magasin, hvorfra der blev udtaget og analyseret en række prøver af det sekundære grundvand. Boringerne var placeret både inde på grunden (boring B5, 59, 60 og 61) og nedstrøms denne (boring 62-64) - se figur 4.8. Den højeste arsen koncentration, der blev fundet i denne monitoringsrunde, var 1,8 µg/L, som målt umiddelbart under fyldpladsen i det syd-østlige hjørne af Collstrupgrunden (boring B5). Samfundsteknik anslår samtidig det naturlige baggrunds niveau for arsen til at være 0,2-0,4 µg/L.



Figur 5.1: Forureningsfanens mulige placering i det sekundære grundvand

At der ikke er fundet markant forhøjede arsenkoncentrationer nedstrøms grunden, skyldes måske, at borerne ikke rammer forureningsfanen. Boring 63 står, som man kan se af figur 4.8, ikke umiddelbart der, hvor man af pejledata (Samfundsteknik, 1990) vil forvente en tilstrømning af forurenat vand, hvilket nok er forklaringen på, at der aldrig er truffet forurening i denne boring. B62 og til dels 64 står derimod, hvor man ville forvente en forureningsfane, og da der ikke er konstateret forhøjede koncentrationer af arsen i disse borer, tyder målingerne på, at der ikke fra denne lækage er dannet en forureningsfane i det sekundære magasin.

5.2.3 Det primære grundvand

På Collstrupgrunden findes der ingen borer til det primære magasin. Vandkemiske data (tabel 5.2) er derfor indhentet fra indvindingsboringerne på Stenholt vandværk, der ligger 1 km nordvest for grunden. Der har på vandværket været problemer med for høje fluoridkoncentrationer, men dette skyldes snarere et naturligt højt baggrunds niveau (velkendt i sjællandske kalkmagasiner) end forureningspåvirkning. Arsenkoncentrationen i det primære magasin er under 1 µg/L, hvilket er det naturlige baggrunds niveau.

5.3 Overfladevand og sediment i vandløb og grøfter

Det terrænnære grundvand drænes fra Collstrupgrunden til grøftesystemet i skoven nord-øst for grunden (se figur 4.8 og 5.2). Grøfterne umiddelbart i nærheden af grunden er tør lagte om sommeren. I sumpområdet umiddelbart syd for Hillerødvejen (ved boring 71) er grøfterne vandfyldte året rundt på grund af artesiske forhold i det terrænnære og det sekundære magasin. Vandet herfra løber under Hillerødvejen og videre via grøfterne til Esrum Sø. Også den gren, der løber gennem Hjortedammen (se figur 5.2) er vandfyldt en stor del af året.

		DGU (1977)	Samfundsteknik (1989b)	Rambøll (1996)	Niras (1999)	Falkenberg (2006a,b)	Orbicon (2009)
Vand [µg/L]	As	<1*	0,4*-15	i.m.	i.m.	12	0,2*-58
	Cr	<1*-37	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.
	Cu	<1*-13	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.
Sediment [mg/kg]	As	i.m.	1,4*-567	2*-1340	<5*-89	<5*-205	<5*-106
	Cr	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.
	Cu	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.	i.m.

Tabel 5.3: Målinger af metaller i overfladevand og sediment i grøfter og vandløb nord-øst for Collstrup-grunden, hvor der har været strømmende vand i måleperioden

*På niveau med baggrundsværdier i.m.- ikke målt

Der er gennemført flere undersøgelser af forureningsniveauet i grøfter og vandløb i perioden 1977 - 2009. Målinger af forureningsniveauet i vandfase og bundsedimenter er opsummeret i tabel 5.3. I overfladevandet er der fundet enkelte overskridelser af det naturlige baggrundsniveau, men generelt **lave koncentrationer af arsen**. Det er bemærkelsesværdigt, at man i 1977 ikke fandt arsen, men derimod krom og kobber i grøfterne. Det kan skyldes, at de fundne metaller stammer fra udledning af imprægneringsvæske til grøftesystemet, snarere end udvaskning fra jorden. I senere undersøgelser er der ikke målt krom og kobber, men her har man til gengæld fundet arsen, især i grøfterne tæt på grunden.

Orbicon har i foråret 2009 gennemført undersøgelse af grøfter og vandløb mellem Esrum Sø og Collstrupgrunden med fokus på at monitorere **arsenbelastningen fra overfladevandet til Esrum Sø**. Der er målt vandføring og koncentrationer af hhv. kolloidt bundet og opløst arsen 9 steder samt i 3 referencepunkter. På baggrund af disse data er der lavet beregninger af arsenbelastningen af Esrum Sø fra Collstrupdepotet. Denne opgøres til at være ca. 1000 g over de 12 måneders måleperiode. Tæt på depotet (ved boring 71) ses forhøjede koncentrationer op til 58 µg/L, men længere nedstrøms er koncentrationen på niveau med det naturlige baggrundsniveau i referencestationerne. Falkenbergs (2006) måling af grøftevand med 12 µg/L arsen ved Esrum sø blev ikke genfundet i Orbicons undersøgelse (2009), Koncentrationsniveauerne ved udløbet til Esrum sø svarede til det naturlige baggrundsniveau på 0,2-2 µg/L og en påvirkning fra Collstrupdepotet kan ikke skelnes fra det naturlige baggrundsniveau her. Der sker altså en betydelig fortynding eller sorption til grøftesedimenterne inden vandet når Esrum sø.

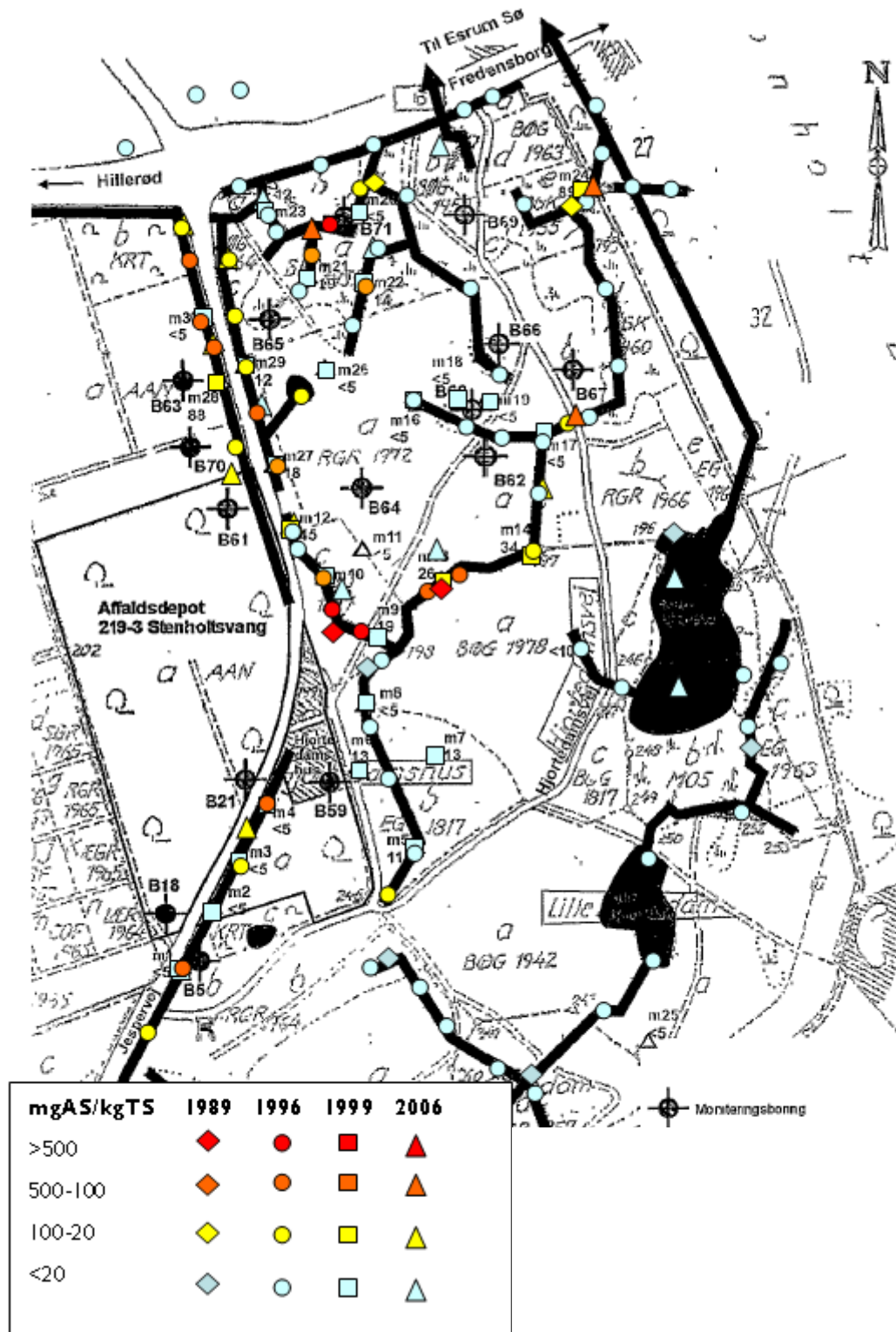
Resultaterne af **sedimentmålingerne** i hhv. 1989, 1996, 1999 og 2006 er endvidere vist på et kort over grøfterne i figur 5.3. Som det fremgår af figuren, er der fundet forhøjede arsenkoncentrationer i sedimentet i de grøfter, der løber langs hegnet ved grunden. Grøfterne er dog tørlagte en stor del af året, men arsen ser ud til at transporteres via disse grøfter, idet der nedstrøms i grøftesystemet også er fundet forhøjede arsenkoncentrationer i sedimentet. Der er kun et enkelt sted, bortset fra de grøfter, der ligger direkte op til grunden, hvor der med sikkerhed er påvist tilstrømning af forurenat grundvand til grøftesystemerne, nemlig ved **boring 71**. Her er målt 4 µg/L arsen i grundvandet i det nederste filter (Niras, 2000). Dette afspejles tydeligt i sedimentmålingerne (figur 5.3), hvor sedimentet i grøfterne omkring boring 71 i 1996 og 2006 indeholdt mere end 100 mg/kg arsen, mens der opstrøms i de samme grøfter, ikke er fundet arsen.

Grøftesystemet er **oprenset i 1996** og kontrollerende prøver bekræftede at forureningsniveauet var nedbragt til omkring 20 mg/kgTS i hele grøftesystemet. I 1999 og 2006 blev der lavet monitoringsrunder med udtagning af sedimentprøver. Falkenberg (2006b) fandt arsenkoncentrationer i grøftesedimentet på op mod **200 mg/kgTS i grøftesystemet**, der afvander Hjortedamssøen. Disse prøver havde dog lavt tørstofindhold og det anføres, at det er grunden til de høje koncentrationer. Det er dog snarere et spørgsmål om jernindholdet i sedimentet, idet jernoxider (okker) vil akkumulere arsen fra overfladevandet. Bemærkelsesværdigt er det dog, at der blev fundet 90 mg/kg arsen i en prøve fra sumpområdet ved bredden af Esrum sø (markeret på figur 5.2). Det er ikke langt herfra, der tidligere er set tegn på opstrømning af grundvand (se næste kapitel).

Undersøgelserne af grøfter og vandløb viser, at der sker en (delvist grundvandsbåret) transport af arsen fra Collstrupdepotet ud i grøftesystemet. Størstedelen af denne arsen tilbageholdes i sedimentet i grøftesystemet.. Den seneste undersøgelse af grøfter og vandløb viser desuden, at den overfladevandsbårne transport af arsen til Esrum Sø i dag er på niveau med det naturlige baggrunds niveau (Orbicon, 2009). At der er så lidt arsen i det vand, som løber ud i søen, må skyldes, at den arsen, som udvaskes fra Collstrup grunden tilbageholdes i bundsedimenterne i grøfter og vandløb tæt på grunden.



Figur 5.2: Oversigt over grøftesystemerne, der afvander Collstrupdepotet



Figur 5.3: Arsenkoncentrationen i sedimentet ved alle målerunder. Kontrolrunden i 1996 efter oprensningen er ikke medtaget. Her lå alle prøver under 20 mg/kgTS

5.4 Møllekrogen og Esrum Sø

Der er gennemført to undersøgelser med det formål at afdække, i hvilket omfang Møllekrogen, som er den sydlige del af Esrum Sø, er påvirket af arsen udvasket fra Collstrupgrunden. Resultaterne af de to undersøgelser er sammenfattet i tabel 5.4.

	Frederiksborg amt (1991)	COWI (1994)
Sediment [mg/kg]	Møllekrogen 1,4 - 23	Østlig profil 2,7 - 9,7
	Reference 0,18* - 0,32*	Vestligt profil 2,4 - 7,5

Tabel 5.4: Målinger af arsen i sedimenter fra Esrum sø

*På niveau med baggrundsværdier

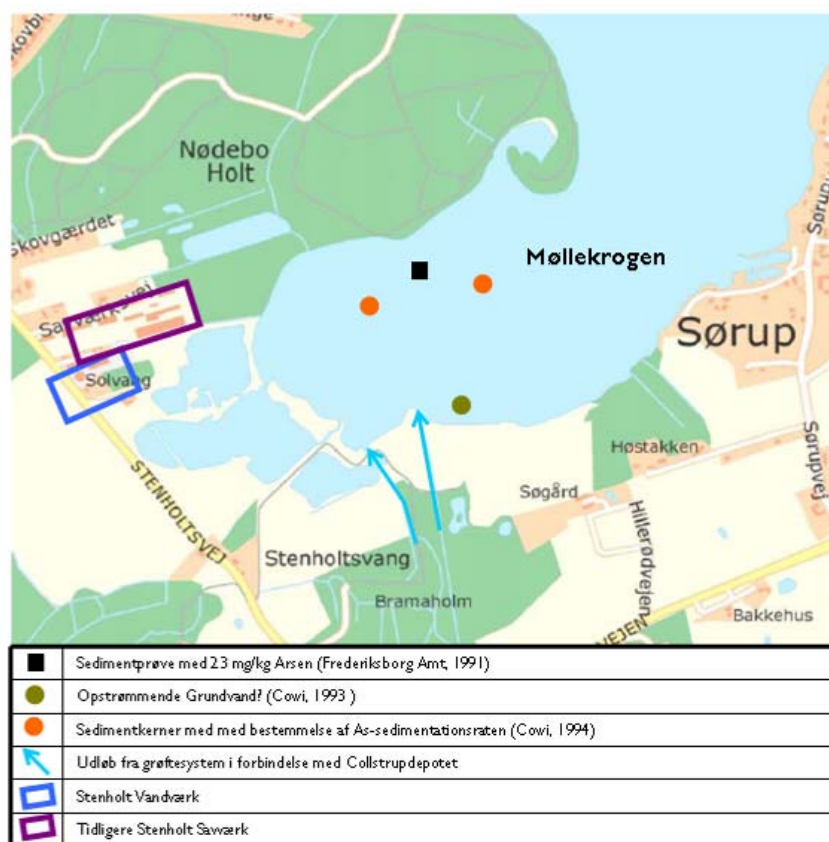
Frederiksborg Amt iværksatte i 1991 en undersøgelse af arsenindholdet i bundsediment fra Møllekrogen. I denne undersøgelse fandtes **forhøjede arsenkoncentrationer** (op til 23 mg/kg i den nordlige del Møllekrogen) i forhold til en referenceprøve udtaget ved Sørup Havn og Endrup Vig, som ligger længere nordpå i Esrum Sø samt i forhold til referenceprøver udtaget i Bastrup Sø og Burre Sø (Frederiksborg Amt, 1992). En undersøgelse af det tidligere Stenholt Savværk, en nabo til Stenholt Vandværk, gav ikke anledning til at tro, at arsenbelastningen skulle stamme derfra (Frederiksborg Amt, 1992). Placeringen af bund-prøven med det højeste arsenindhold ses i figur 5.4.

Samtidigt med at der konstateredes forhøjede arsenkoncentrationer i Møllekrogen er der undersøgt **fisk** fanget i hhv. Møllekrogen og Gurre Sø. Her fandtes ingen tegn på ophobning af arsen i fisk fra Møllekrogen (Frederiksborg Amt, 1992).

I 1993 – 94 blev der gennemført yderligere undersøgelser, som havde til formål at klarlægge bundforholdene og eventuelle sedimenteringsområder i Møllekrogen. Undersøgelserne omfattede udtagning af 40 sedimentprofiler i Møllekrogen, og der blev endvidere udtaget sedimentkerner til beregning af arsenakkumuleringen i søbunden. Ved Bramaholm/Søgården blev der desuden udtaget en sedimentprøve med en markant lavere temperatur (markeret med grønt i figur 5.4). Den lavere temperatur tolkes som et tegn på **opstigende grundvand**. Der er desværre ikke lavet en totalanalyse af arsen på denne prøve, så det vides ikke, hvor arsenbelastet grundvandet er (COWI, 1993). I 1994 blev der udtaget en kerne tæt herved, men denne er tilsyneladende ikke blevet analyseret (Cowi, 1994).

I 1994 blev der udtaget yderligere 7 sedimentkerner i Møllekrogen, hvoraf 2 blev analyseret for arsen og daterede v.h.j.a. bly-analyser (prøvetagningpunkterne for disse to kerner er vist med orange i figur 5.4). I den østlige kerne ses den højeste sedimentationsrate på omkring **3.5 mg/m²/år**. I den vestlige kerne er sedimentationsraten bestemt til omkring 2 mg/m²/år (COWI, 1994). Arsenkoncentrationerne i sedimentet overstiger ikke 10 mg/kg TS, men er dog væsentligt forhøjede i forhold til baggrundskoncentrationerne på 0,2 mg/kg TS (Cowi, 1994). På baggrund af koncentrationer målt i søsedimentet er den **totale arsenpulje i Møllekrogen opgjort til ca. 100 kg** (COWI, 1994).

I forbindelse med ovenstående undersøgelser blev der ikke analyseret vandprøver fra Esrum Sø.



Figur 5.4: Oversigtskort over Møllekrogen med placering af udvalgte sedimentprøver

Alt i alt kan det konkluderes, at arsenkoncentrationerne i bundsediment fra Møllekrogen er forhøjede i forhold til det naturlige baggrunds niveau. (Sedimenternes arsen-indhold overskrider generelt ikke kvalitetskriteriet for jord på 20 mg/kg). Transport af arsen fra Collstrup-grunden til Esrum Sø kan foregå både som overfladevandsafstrømning gennem grøfter og vandløb eller som opstrømning af forurenede grundvand gennem søbunden. Som beskrevet i afsnit 5.3, er arsenbelastningen af Møllekrogen fra de vandløb, som afvander Collstrup-grunden, i dag ikke større end fra andre vandløb i området. Tidligere - da træimprægneringsvirksomheden var aktiv - har der formodentlig været en større belastning af Møllekrogen gennem grøfter og vandløb - bl.a. fordi man har ledt forurenede procesvand direkte ud i grøfterne. Forureningens omfang i det sekundære magasin er usikkert bestemt på grund af manglende data, men hvis der er en forureningsfane i det sekundære magasin er det muligt, at der kan ske opstrømning af arsenforurenede grundvand fra dette magasin til Esrum sø.

6 Forureningstransport

I dette kapitel gives en oversigt over de transportveje, der er, for den forurening, som udvaskes fra Collstrupgrunden. Desuden refereres tidligere udførte beregninger af arsen-udvaskningen fra grunden til omgivelserne.

På grund af stoffernes høje mobilitet er det arsen og fluorid, der vil udvaskes fra jorden på Collstrupdepotet. Fluorid ophobes, i modsætning til arsen, ikke i sediment, hverken i grøfterne eller i søsedimentet, men vil formentlig fordele sig jævnt i vandmassen i Esum sø. Undersøgelsen af grøftevandet viser desuden, at fluoridkoncentrationen i overfladevandet i grøftesystemet er meget tæt på baggrundsniveauet. Arsen er markant mere toksisk end fluorid og genfindes i grund- og overfladevand i koncentrationer, der langt overstiger kvalitetskriterierne. Derfor er dette kapitel, der belyser forureningstransporten væk fra depotet, koncentreret om arsen.

6.1 Transportveje

Forureningstransporten væk fra Collstrupdepotet sker overvejende p.g.a den nedbør, der falder på grunden. Hermed vaskes især arsen ud af bark og jord og transporteres til det terrænnære grundvand.

En del af det terrænnære grundvand drænes ud i grøftesystemet og strømmer herigennem direkte til Esum Sø. Da arsen sorberes stærkt til jernoxidpartikler er det sandsynligt, at transporten i grøftesystemet er proportional med strømningshastigheden og at der i perioder med stærk strøm i vandløbene transporteres mere arsen. Dermed er det muligt at arsenbelastningen af Esum sø er årstidsbestemt idet f.eks. tordenbyger om sommeren vil give høje strømningshastigheder. Orbicons undersøgelse (2009) inkluderer et par målinger i forbindelse med store nedbørshændelser, men der ses ikke en konsistent sammenhæng mellem indholdet af partikulært bundet arsen i grøftevandet og strømningshastigheden. Målingerne er dog ikke udført på det tidspunkt, hvor vandføringen når sit maksimum, og der er 2 gange målt næsten dobbelt så store vandføringer som på de tidspunkter, hvor der er udtaget prøver. Hvis der sker en vandføringsproportional transport, sker den i så fald kun enkelte gange om året.

En andel af det terrænnære grundvand vil formentlig løbe gennem moræneleren i de områder, hvor der er fundet lækager mellem det terrænnære og det sekundære magasin. Hvor stor en del af det forurenede grundvand, der løber gennem morænen vides ikke, da der kun er fundet meget lave koncentrationer i enkelte prøver fra det sekundære magasin. Det er derfor vanskeligt at vurdere risikoen for forurening i det primære magasin, idet det afhænger af, om der findes markant forhøjede arsenkoncentrationer i det sekundære magasin.

6.2 Beregninger af arsenudvaskningen fra Collstrupdepotet

Der er i det foreliggende baggrundsmateriale lavet 3 skøn over arsenpåvirkningen af Esum Sø fra Collstrupgrunden (Samfundsteknik (1990), Falkenberg (2006a) og Orbicon (2009))

Samfundstekniks (1990) skøn af arsenbelastningen på 550 g/år er baseret på en arsenkoncentrationer i det sekundære grundvand og recipienterne på hhv. 0,5 µg/L og 0,4 µg/L. Disse koncentrationer er urealistisk lave og svarer snarere til den baggrundsværdi, det forventes at finde i uforurenet grundvand.

Falkenberg (2006a) har ligeledes lavet et overslag over arsentransporten til Esrum Sø. Dette anslår, at der via grøftesystemet transporteres 3-6 kg arsen til søen per år, afhængig af hvor meget der sedimenteres i grøftesystemet. Med denne belastning vil gennemsnitskoncentrationen være 15 µg/L i udløbet til Møllekrogen. En prøve på 12 µg/L taget i grøftesystemet 30 meter før Esrum sø synes at bekræfte den beregnede gennemsnitskoncentrationen.

Orbicons undersøgelse (2009) viser at Esrum Sø i løbet af den 12 måneders måleperiode modtog ca. 1 kg arsen fra de 3 undersøgte vandløb. I størrelsesorden svarer det til den arsenbelastning, der vil være fra uforurenet grundvand med en naturlig baggrundskoncentration, som den Samfundsteknik (1990) regner med.

Som de forhøjede koncentrationer af arsen i grøftesedimentet nær Collstrupgrunden antyder, sker der en tilbageholdelse af arsen i grøftesystemet. En del af dette skyldes sandsynligvis okkerproduktion fra det opstigende grundvand. Okker har en meget høj sorptionskapacitet for arsen og kan i stærkt forurenede områder indeholde adskillige % arsen. At det netop er okkerdannelsen, der begrænser arsentransporten i grøftesystemet, underbygges af de relativt høje arsenkoncentrationer, der findes af Falkenberg (2006b) i sedimentet i grøftesystemet. Der er altså en markant forskel på hvor meget arsen, der udvaskes fra Collstrupdepotet og hvor meget arsen, der ender i Esrum sø.

7 Afværgeforslag

Kapitel 7.1 giver en oversigt over de afværgeforslag, der hidtil er udarbejdet for Collstrupgrunden. I kapitel 7.2 er listet en række nye afværgeløsninger, der er dukket op siden afværgekatalogerne er udarbejdede. Endeligt gives en vurdering af afværgeteknikernes brugbarhed og begrænsninger i kapitel 7.3.

7.1 Opsamling af de eksisterende afværgekataloger

Der er to afværgekataloger for grunden, forfattet af hhv. Samfundsteknik (1991a) og Rambøll (1994). I tabel 7.1 er vist en oversigt over de forskellige afværgeforslag fra de to kataloger. Tabellen er opbygget således, at hver række udgør et selvstændigt afværgeforslag. Hvert forslag indeholder en afværgeløsning overfor jordforureningen på grunden (beskrevet i kolonnen "Afværge på kilden") og en afværgeløsning overfor det forurenede grundvand under grunden (beskrevet i kolonnen "Afværgepumpning og vandrensning"). De følgende kolonner viser prisen i datidskroner hhv. for etablering, drift og samlet efter 105 års drift. For forslagene fra Samfundsteknik 1991a figurerer også en pris (yderste højre kolonne i tabel 7.1), der inkluderer en økonomisk fremskrivning. Denne er dog ikke nærmere defineret i rapporten, men priserne er – som det fremgår af tabel 7.1 – langt højere end summen af etableringsudgifterne og driftsudgifterne efter 105 år. De forslag, der er markeret med gråt, ventes at have længere behandlingstid end de 105 år, da de ikke eller kun delvist nedbringer kildestyrken. I afværgekatalogerne er der i øvrigt ingen forklaring på, hvorfor man har valgt at lave driftsberegningen over 105 år.

I indberetninger til Miljøstyrelsen af større forureningssager har figureret en oprensningspris på 200-250 mill. kr, der gør Collstrupgrunden til én af de dyreste grunde i Danmark at oprense. Denne pris er fremkommet på baggrund af afværgekataloget fra Samfundsteknik (1991a), hvor man har inkluderet renteudgifter i den samlede opgørelse. Dette medfører priser over 200 mill. kroner (forslag 8 og 12). I dag er der ikke tradition for at inkludere renteudgifter i økonomiske beregninger af afværgeanlæg.

Nr	Afværge på kilden	Vandrensning Pump-and-treat	Etablering [mill kr]	Løbende udgifter [mill kr/år]	Pris efter 105 år [mill kr]	Beregnet totalpris* [mill kr]
Jordrens						
1	Elektrokinese	Arsen	46	0,195	66,5	142
2	Elektrokinese	Arsen, fluorider	47	0,265	74,8	177
3	Jordvask	Arsen	42	0,195	62,5	137
4	Jordvask	Arsen, fluorider	42	0,265	69,8	158
Specialdepoter med perkolatopsamling						
5	Minimum af jord i specialdepot	Arsen	17	0,195	37,5	120
6	Minimum af jord i specialdepot	Arsen, fluorider	18	0,265	45,8	154
7	Minimum af jord i specialdepot	Arsen, fluorider Etablering og drift af kloak	19	0,345	55,2	194
8	Minimum af jord i specialdepot, dækkes med membran	Arsen, fluorider Etablering og drift af kloak	25	0,345	61,2	200
9	Forurennet jord i specialdepot	Arsen	21	0,195	41,5	124
10	Forurennet jord i specialdepot	Arsen, fluorider	22	0,265	49,8	158
11	Forurennet jord i specialdepot	Arsen, fluorider Etablering og drift af kloak	23	0,345	59,2	198
12	Forurennet jord i specialdepot, dækkes med membran	Arsen, fluorider Etablering og drift af kloak	28	0,345	64,2	203
13	Specialdepot, al jord over 20 mg/kg As	Arsen, kun 10 år	29	0,8 (10 år) 0,2 (95 år)	56,0	-
14	Specialdepot, al jord over 20 mg/kg As	Ingen	29	0,2	50,0	-
15	Specialdepot, Al jord over 80 mg/kg As	Arsen	25	0,84	113,2	-
16	Hotspots i eksternt depot, resten dækkes med membran	Ingen	17	0,5	69,5	-
17	Hotspots i depot, toplag af ren jord	Arsen	14	0,7	87,5	-
Depoter uden bundmembran						
18	Tildækning	Arsen	13	0,195	33,5	116
19	Tildækning	Arsen, fluorider	13	0,265	40,8	150
20	Tildækning	Arsen, fluorider Etablering og drift af kloak	14	0,345	50,2	190
21	Samles i bunke	Arsen	16	0,195	36,5	119
22	Samles i bunke	Arsen, fluorider	16	0,265	43,8	153
23	Samles i bunke	Arsen, fluorider Etablering og drift af kloak	18	0,345	54,2	173
24	Minimum af jord samles i bunke	Arsen	13	0,195	33,5	116
26	Minimum af jord samles i bunke	Arsen, fluorider	14	0,265	41,8	151
27	Minimum af jord samles i bunke	Arsen, fluorider Etablering og drift af kloak	16	0,345	52,2	191
28	Toplag af ren jord	Arsen	11	0,7	84,5	-
29	Ingen tiltag på grunden	Arsen	10	0,7	83,5	-

Tabel 7.1: Afværgeforslag for Collstrupdepotet. Forslag nr 1-14 og 18-27 er fra Samfundsteknik (1991a). Forslag 13-17 og 28-29 er fra Rambøll (1994)

*Totalprisen er en økonomisk fremskrivning gennem 105 år

7.1.1 Rensning af forurennet grundvand

Næsten alle afværgeforslagene i tabel 7.1, nemlig 1-13 og 17 til 29, opererer med oppumpning og efterfølgende behandling af det arsenholdige grundvand. Vandbehandling for arsen foretages ved tilsætning af FeCl_2 , hvorved der dannes jernoxidpartikler, der binder arsenen og efterfølgende fjernes i et udfældningsbassin. Alternativt kan vandet filteres på en jernoxidholdig sorbent. Vandrensningen er ikke nærmere defineret i Rambølls (1994) afværgeoplæg.

Da det terrænnære grundvand også overskrider kriterierne for fluorid har man i Samfundstekniks (1991a) afværgeforslag undersøgt forskellige muligheder for rensning for fluorid. Ingen af de testede metoder kunne dog nedbringe fluoridkoncentrationen til et acceptabelt niveau.

7.1.2 Rensning af den forurenede jord

De første 4 afværgeforslag inkluderer rensning af jorden med hhv. elektrokinese og jordvask. Rensningen foregår på stedet.

Elektrokinetisk jordrens er en metode, der forskes i på DTU Byg (DTH, 1992 og Ottosen et al. 2009), men metoden har aldrig været anvendt på større skala. Princippet i metoden er at installere væskefyldte filtre, hvori der sættes elektroder. Ved at sætte strøm til elektroderne bevæger metalionerne sig mod elektroderne, og væsken omkring filtret pumpes op og renses. Metoden virker særligt god over for kobber og krom, men knap så effektivt over for arsen. Endvidere medvirker indholdet af fluorid til at elektroderne tæres hurtigere. Strømforbruget er desuden meget højt.

Onsite jordvask har været benyttet i Hjältevad i Sverige, hvor 26.000 tons arsenforurennet jord med en gennemsnitskoncentration på 146 mg/kg blev behandlet. Metoden medfører, at finfraktionen sorteres fra og deponeres, idet den ikke overholder oprensningskriteriet på 40 mg/kg. Herved fjernes i alt 2600 kg arsen, 65% af hvad der formodes at være fra før oprensningen. Man deponerede de 3000 tons finfraktion på specialdepot. De samlede omkostninger for anlægsarbejde og jordrensning beløb sig til 35-40 mill SEK (Englöv, 1998). På Luleå Universitet er man i øjeblikket i gang med at lave en undersøgelse af jordvaskning som afværgeteknologi til CCA forurennet jord (Amofah, 2009), men der er ingen resultater herfra endnu.

7.1.3 Deponering af jord

Forslag 5-17 inkluderer etableringen af et specialdepot, dvs. der etableres membran under den forurenede jord og opsamles drænvand fra depotet. Membranen kan bestå af enten plastmateriale eller bentonit. For at mindske mængden af perkolat, kan der lægges en plasticmembran ud over depotet. I alle tilfælde er der tale om deponering på stedet.

I de følgende forslag (18-28) udlægges ikke en bundmembran. Tildækning af den forurenede jord med plastik forhindrer udvaskning, men dækkematerialet skal fornyes ofte, da det nedbrydes af UV-lys. Samling af den mest forurenede jord i bunker medfører kun, at det afspærrede område kan formindskes.

7.2 Nye afværgeløsninger

I Danmark har de fleste CCA forurenede grunde været af en størrelse, hvor det var billigst at bortgrave og deponere den forurenede jord. I betragtning af hvor mange grunde, der findes af denne type, er det til dels overraskende, hvor få erfaringer, der er gjort med afværgeforanstaltninger udover bortgravning. En del af forklaringen er formentlig, at mange af grundene, som Collstrupgrunden, ligger "ude i skoven" i relativt tyndt befolkede områder. Der er ikke nogle af de forsøg, der indtil nu har været foretaget, der tyder på, at man har fundet den enkle, billige, etiske og æstetiske metode, der virker hver gang.

I det følgende beskrives et par af de metoder der har været anvendt på CCA-forureninger og nye metoder, der stadig er på pilotstadiet.

7.2.1 Stabilisering med jern

En stabilisering med Fe(0) eller jernoxider vil nedsætte udvaskningen af arsen fra grunden, idet arsen sorberes meget stærkt på jernoxider. Jernmaterialet blandes med jorden, hvorved der skabes kontakt mellem det arsenholdige porevand og jernoxidoverfladen.

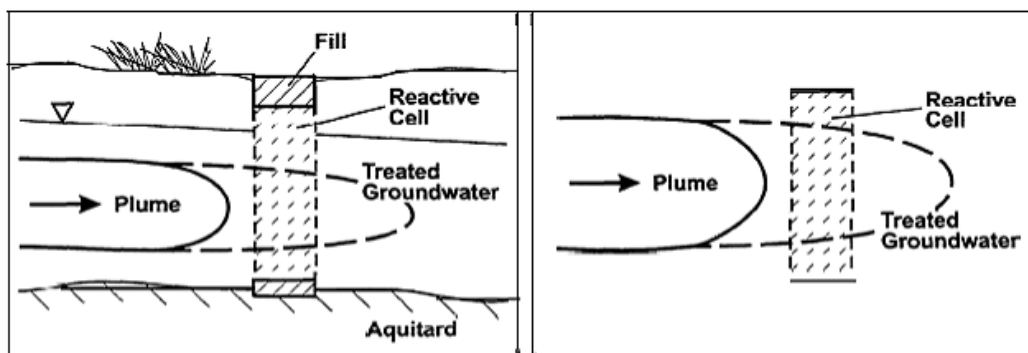
Hopp et al. (2006) beskriver en CCA-forurenet grund, hvor man i 1980'erne har behandlet jorden med **Fe(II)-sulfat** pga. meget høje Cr(VI)-koncentrationer. Jernsulfat vil reducere Cr(VI) til det immobile Cr(III) under dannelse af jernoxider. Behandlingen lykkedes, idet der blev observeret markant lavere Cr(VI) koncentrationer i grundvandet, men det blev ikke dannet nok jernoxider i jorden til at arsenudvaskningen blev væsentligt formindsket. Da reaktionen med Fe(II)-sulfat danner H_2SO_4 , der kan mobilisere kobber, vil man ofte iblande kalk samtidig (Kumpiene et al., 2008), men selv da ses en øget mobilisering af kobber. Et alternativ til Fe(II)-sulfat er **Fe(0)-granulat** (findelt jernskrot), der opblandes i jorden. Fordelen er at jernskrottet indeholder 3 gange så meget jern per vægtenhed som jernsulfat. Fe(0) oxideres i jorden til jernoxider, hvorpå arsen sorberes. Disse jernoxider virker som katalysatorer for oxidation af As(III) til As(V) når der er oxidationsmidler til stede (Kumpiene et al., 2008)

På Collstrupgrunden har DTU siden 2007 kørt et lille feltforsøg, hvor jorden er behandlet med 3 % okkerslam. Okkerslam er et affaldsprodukt fra vandværkerne og dermed gratis. Porevandskoncentrationen af arsen er i den okkerbehandlede jord omkring 50 µg/L mod op mod 60 mg/L i en ubehandlet reference. **Mobiliteten af arsen nedsættes altså med næsten en faktor 1000** ved stabilisering med okkerslam. Metoden vil kræve, at den eksisterende beplantning fjernes og at jorden bearbejdes ned til 1 mut. Okker kræver oxiderede forhold og vil opløses ved reduktion til Fe^{2+} helt eller delvist, hvis det kommer ned hvor der er anaerobe forhold. Fe(0) bør derimod kunne bruges på større dybde, da det danner andre jernforbindelser der stadig kan sorbere arsen under anaerobe forhold. Stabilisering med Fe(0) eller okkerslam vil dog næppe kunne reducere udvaskningen af arsen så meget, at grundvandskriteriet på 5 µg/L overholdes uden en væsentlig fortynding.

7.2.2 Permabel reaktiv barriere (PRB) med Fe(0)

I stedet for at behandle kilden, kan man i stedet behandle forureningsfanen med en reaktiv barriere med Fe(0). Barrieren virker ved, at det forurenede vand løber

gennem jerngranulat, som alt efter redoxforholdene vil der danne jernoxider eller sulfider. Dermed sorberes eller indbygges arsen i mineralfasen og koncentrationen i forureningsfanen nedsættes markant. En skematisk tegning af PRB-princippet ses i figur 7.1 herunder.



Figur 7.1: Skematisk tegning af permeabel reaktiv barriere set fra siden (tv) og oppe fra (th)

Ved at pumpe forurennet vand fra forsiden til bagsiden af den reaktive barriere er det ikke nødvendigt at rense det oppumpede vand fra forureningsfanen idet arsen opfanges i barrieren. Dette forudsætter dog, at barrieren har kapacitet til at binde arsenen i den højere vandflux, som vil være resultatet af en sådan samtidig afværgepumpning af forureningsfanen.

I Helena, Montana har USEPA lavet et pilotforsøg med en permeabel reaktiv barriere, hvori arsenkoncentrationen i grundvandet **nedsættes fra 25 mg/L til ca. 0.5 mg/L** (USEPA. 2008). Dette er dog stadig langt over grundvandskvalitetskriteriet.

På Collstrupgrunden vil det fortrinsvis være det terrænnære grundvand, der skulle ledes gennem barrieren. Dette grundvand er kun delvist reduceret, og det kan give problemer i barrieren idet for meget ilt vil danne store mængder jernoxid, der vil ændre den hydrauliske ledningsevne i barrieren, så det forurenede grundvand ledes uden om og barrieren bliver virkningsløs. Ydermere er der kalk i sedimentet, som gør, at der vil være et højt karbonatindhold i grundvandet. Dette kan, sammen med den hævnning af pH som kommer, når $\text{Fe}(0)$ reagerer til Fe^{2+} , medføre udfældning af Fe -karbonat, som også vil nedsætte den hydrauliske ledningsevne. Det vil altså kræve en **undersøgelse af de geokemiske forhold**, samt in-situ forsøg før en permeabel reaktiv barriere kan vurderes som en reel alternativ afværge metode.

7.2.3 Behandling af Cr(VI)

Coast wood i Ukiah, Californien, er en træimprægneringsgrund forurennet med CCA. Det er i dette tilfælde kun hexavalent krom, der har udgjort en trussel for grundvandet. Gennemførslen af afværgeforanstaltninger af sitet er sket i 2 deleter: Først afskærmning af jordforureningen med belægning og stabilisering af jorden med cement. Dernæst installering af spunsvægge og oppumpning af forurennet grundvand til behandling. Indkapsling af jordforureningen blev igangsat i 1990, men jorden er i 2003 deponeret på et kontrolleret deponi andetsteds. Da Cr(VI) er den mest kritiske forureningskomponent på Coast Wood har man forsøgt en in situ reduktion ved at injicere calcium polysulfid. Dette har nedbragt Cr(VI) koncentrationerne fra

17.000 µg/L i enkelte boringer til 10 µg/L, der er oprensningskriteriet (USEPA, 2006). Selv om det ikke er blevet undersøgt, er der meget der tyder på, at det meste af det krom, der findes på Collstrupgrunden, allerede findes som Cr(III).

7.3 Vurdering af afværgeløsninger

Hvis der skal gennemføres afværgetiltag på Collstrupgrunden, bør afværgemetoden afhænge af den risikovurdering, der laves. Når den konceptuelle model for forurenings spredningsveje er helt på plads, vil man kunne afgøre hvilke spredningsveje, der bør afskæres.

For bedre at kunne vurdere de forskellige afværgeteknologier i forhold til hinanden er de i kapitel 7.1 og 7.2 nævnte afværgemetoder listet i tabel 7.2. Prisindikationen er et relativt skøn af, hvad de forskellige metoder vil komme til at koste på Collstrupdepotet. De eksisterende afværgeforslag spænder bredt fra kosmetisk udlægning af ren jord, til omfattende udgravninger og komplet oprensning. Fælles for de løsninger, der renser den forurenede jord, er, at de ikke tidligere udført i så stor skala. Jordvask har dog været anvendt på en mindre forureningssag, mens elektrokinese ikke har været forsøgt på fuld skala. De nyere metoder, PRB og stabilisering, virker ved at tilbageholde arsen og fjerner dermed ikke forureningen. Disse metoder forventes at være væsentligt billigere end etableringen af et kontrolleret deponi, og selvom arealerne ikke vil kunne benyttes frit, vil det æstetiske indtryk på den forbigående trafik være langt bedre. En løsning hvor grundvandet behandles uden at kildestyrken reduceres væsentligt, er ud fra tabel 7.1 at dømme, den mindst økonomisk holdbare løsning, idet vandet vil kræve behandling i århundreder. Grundvandsbehandling bør snarere være en løsning, der fjerner forureningsfanen, når der er iværksat afværgeforanstaltninger mod yderligere udvaskning fra grunden.

	Forhindrer udvaskning af arsen fra grunden	Kræver indhegning	Pris Etablering/drift	Har været anvendt i stor skala
Elektrokinetisk Jordrens	Ja	Nej	+++/>++	Nej, kun pilotforsøg ¹
Jordvask	Ja	Nej	++/>++	Ja, på Hjaltevad ²
Deponi med indkapsling	Ja	Nej	+++/>+	Ja
Stabilisering	Delvist	Ja	+/>+	Ikke med okkerslam, kun med Fe(0) ³
Permeabel reaktiv barriere	Nej	Ja	+/>+	Ja, i USA ⁴
Pump and Treat	Nej	Ja	+/>+++	Ja, almindelig afværge for arsen

Tabel 7.2: Oversigt over de forskellige afværgeteknologier

¹DTH (1992) ²Englöv (1998) ³Kumpiene et al. (2008) ⁴USEPA (2008)

Elektrokinetisk jordrens har kun været brugt på pilotskala og er ikke effektiv til oprensning af arsenforurening. Metoden er endnu ikke færdigudviklet og det vil kræve yderligere udvikling at kunne bruge den på en konkret sag. Jordvask har aldrig

været udført på så stor skala før og metoden medfører desuden at den arsenholdige finfraktion deponeres. Medmindre en ændret arealanvendelse bliver af afgørende betydning, er disse løsninger derfor ikke optimale. Et kontrolleret deponi med perkolatopsamling vil forhindre al yderligere udvaskning, men er markant dyrere end stabilisering. Stabilisering og permeable reaktiv barriere vil kunne begrænse udvaskningen af arsen til grundvandet, men vil kræve yderligere undersøgelser af geologi og grundvand for at sikre, at der ikke findes hidtil ukendte spredningsveje.

8 Konklusion og konceptuel model

De følgende afsnit er en opsamling og syntese af udredningens foregående kapitler.

8.1 Jordforurening

Forureningens omfang på selve Collstrupdepotet antog i 1989 ca. 35 tons arsen samt ca. 5 tons krom og ca. 7 tons kobber fordelt i mindst 280.000 m³ jord. Masseestimatet er dog muligvis for lavt, da det formentlig er baseret på resultatet af den fladedækkende undersøgelse lavet af Samfundsteknik (1989b), der ikke medtager imprægneringsslam i de imprægneringskar, der formentlig stadig findes på grunden.

8.2 Grundvand

Fra undersøgelserne og monitoringen frem til år 2000 vides følgende:

- Der findes 3 grundvandsførende formationer i området, det terrænnære, det sekundære og det primære magasin.
- Det terrænnære grundvand er stærkt forurenet med arsen. En del af dette drænes ud i grøftesystemet.
- De arsenkoncentrationer, der er fundet i det sekundære grundvand, er kun lidt højere end den naturlige baggrundsværdi og overskrider ikke grundvandskvalitetskriteriet på 8 µg/l. Der er 2 borer, der er placeret hensigtsmæssigt i forhold til lokalisering af en eventuel forureningsfane i det sekundære magasin.
- Strømningsretningen i det sekundære grundvand er nordøstlig. På denne baggrund vurderes det, at en eventuel forureningsfane i det sekundære magasin strømmer i retning af Esrum Sø.
- Collstrupgrunden ligger lige på kanten af indvindingsoplandet for Stenholt vandværk, men strømningsretningen i det primære magasin er dog snarere i retning af Esrum Sø end vandværket.

I forhold til forekomsten af en eventuel forureningsfane i grundvandet er der flere uafklarede aspekter:

- Med den påviste **lækage** mellem det terrænnære og det sekundære grundvand, vil der formentlig dannes en forureningsfane i det sekundære magasin. Hidtil har der ikke kunne identificeres en fane i magasinet.
- Det er sandsynligt, at eventuel forurening i det sekundære magasin vil tilstrømme Esrum sø, som indikeret på fig. 8.1. På grund af retardation (dvs. tilbageholdelse af arsen på sedimenterne i grundvandsmagasinet) er det dog ikke sikkert, at forureningsfanen endnu er nået frem til søen, selvom det grundvand, der strømmer op ved søen er infiltreret på Collstrup-grunden (se kapitel 4.3.2).
- Der er ikke lavet et konsekvent og sammenhængende monitoringsprogram for det sekundære grundvandsmagasin. I et sådant program kan indgå udtagning af filtrerede og ufiltrerede prøver og det vil være ønskeligt at måle **specieringen af arsen og krom** for én gang for alle at afgøre toksiciteten og udelukke forekomsten af Cr(VI). For at kende andelen af arsenit i

grundvandet er det nødvendigt med målinger, der specifikt skelner mellem arsenit og arsenat.

- **Pejledata** fra området er 20 år gamle (Samfundsteknik, 1990) og en ny pejlerunde vil være et nødvendigt redskab til at finde eventuelt forurenede grundvand i det sekundære magasin.
- Datagrundlaget i den geologisk model er utilstrækkeligt til at vurdere om det **primære grundvandsmagasin** er truet. Det er usikkert, om der findes en gennemgående lerformation mellem det sekundære og primære grundvand, som begrænser nedsivningen. Det er bl.a. derfor ikke muligt at afgøre, om forureningstransporten udgør en risiko for det primære magasin. De få dybe geologiske borer, der findes i området, tyder på, at det er 2 forskellige lerformationer, der adskiller magasinerne. For at afgøre om det er tilfældet, kræves en undersøgelse af geologien i området mellem Esum sø og Collstrupgrunden. Dette vil kunne gøres med dybe borer (til mindst 60 meter under terræn), men også ved geofysiske undersøgelser som MEP (Multi Elektrode Profilerings) som muligvis, afhængig af lagernes tykkelse, vil kunne indikere lerlagernes udbredelse, eller TEM-sonderinger, som er særlig velegnet til bestemmelse af dybden til et evt. lerlag

8.3 Recipienterne

Der er i perioden 2008-2009 foretaget detaljerede målinger af transporten af arsen gennem de grøfter og vandløb, som afvander Collstrup grunden til Esum Sø. På baggrund af disse målinger ser det ud til, at det arsen, der via det terrænnære grundvand ender i grøftesystemet, tilbageholdes af sedimenterne og derfor ikke transporteres til Esum Sø. Vandet renses således naturligt, før det ledes videre til Esum sø, men der ophobes arsen i sedimenterne i grøfterne. Dette er grunden til, at arsenbelastningen på søen via grøftesystemet svarer til baggrunds-belastningen. . Spørgsmålet er så, om der via det sekundære grundvand (spredningsvej E, figur 8.1) transporteres arsen til søen. Dette afhænger af, om det sekundære grundvand er forurenede, jævnfør afsnit. 8.2.

I bundsedimenter fra Møllekrogen er der i 1990'erne målt forhøjede arsenkoncentrationer i forhold til referenceprøver udtaget længere nordpå i Esum Sø. Det vurderes, at dette kan skyldes, at der tidligere (da træimprægneringsvirksomheden var aktiv) har været en større belastning af Møllekrogen gennem grøfter og vandløb – bl.a. fordi man har ledt forurenede procesvand direkte ud i grøfterne.

8.4 Konceptuel model

I den konceptuelle model af forureningstransporten (figur 8.1) er der fokuseret på arsen, da det som beskrevet i kapitel 6 er den mest problematiske forureningskomponent. Den konceptuelle model opererer med 7 spredningsveje for arsen:

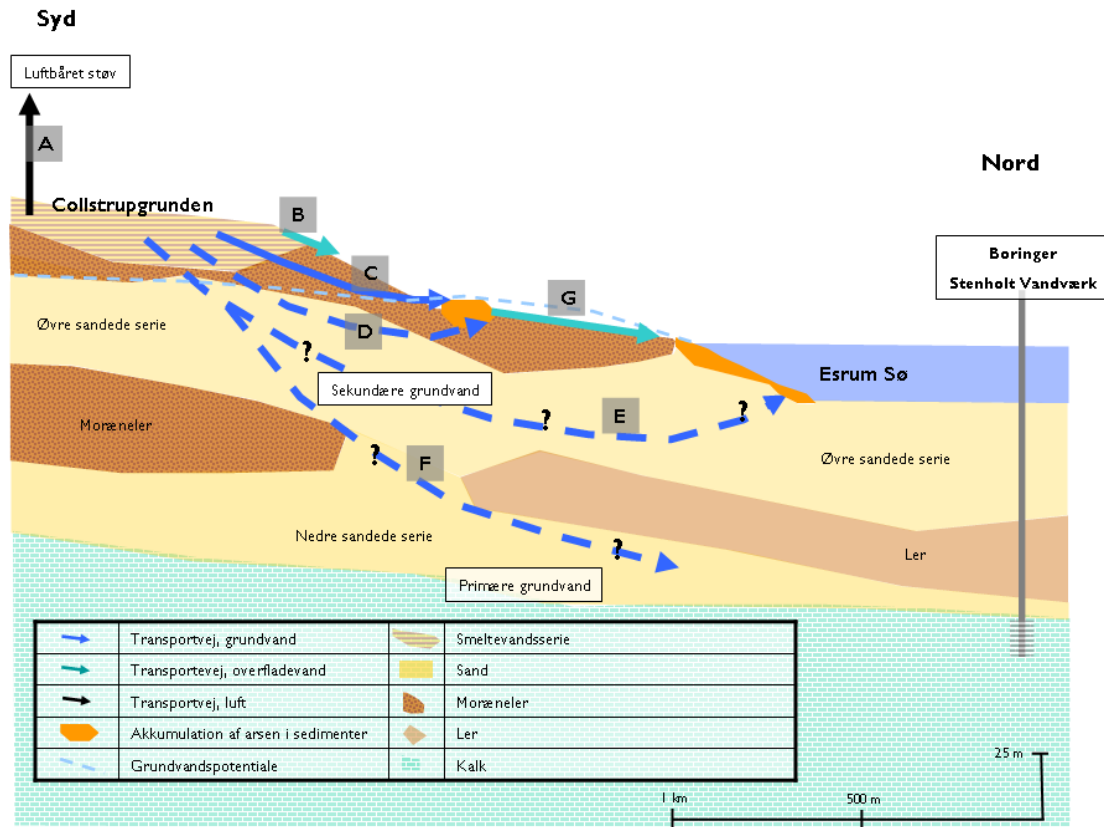
- A - Som luftbåret støv
- B - Overfladeafstrømning (direkte til G)
- C - Gennem det terrænnære magasin til grøftesystemet
- D - Gennem det sekundære magasin til grøftesystemet
- E - Gennem det sekundære grundvand
- F - Gennem det primære grundvand
- G - I grøftesystemet

Det vurderes, at forureningstransporten ved spredningsvej **A** er minimal. Dette synes bl.a. bekræftet af en undersøgelse af overfladejorden på naturlegepladsen Eghjorten, som ligger umiddelbart nordvest for Colstrupdepotet (Dansk Miljørådgivning, 2008). Undersøgelsen viste, at forureningsniveauet uden for det indhegnede, forurenede område ikke overskrider grænseværdierne for bl.a. arsen, kobber og krom i jorden.

Ligeledes vil spredningsvej **B** være begrænset men efter regnhændelser kan overfladevand lige omkring depotet formentlig have forhøjede arsenkoncentrationer.

Spredningsvej **C** og **G** er velbeskrevet i rapporten fra Rambøll (1996) om det terrænnære grundvand og i grøfteundersøgelse fra Orbicon (2009). Der sker en transport af arsen fra det terrænnære grundvand til grøftesystemet, men dette tilbageholdes i sedimentet i grøfterne og ledes ikke ud i Esrum Sø. Tilsvarende vil arsen, som transporteres op gennem vandløbsbunden med det sekundære grundvand, hvor der er artesiske forhold (spredningsvej **D**), blive tilbageholdt i bundsedimenterne. Dette skyldes, at der ved kontakten med iltholdigt vand i bundsedimenterne udfældes jernoxider, som binder både arsenit og arsenat. En tilsvarende tilbageholdelse af arsen i sedimentet kan forekomme i søbunden, hvis forurenede grundvand strømmer op i denne (spredningsvej **E**)

Spørgsmålet er, om der sker forureningstransport gennem de dybere magasiner. I det sekundære grundvand, **D** og **E**, er der ikke konstateret forurening. Dog er borerne i det sekundære magasin ikke placeret helt optimalt i forhold til en evt. forureningsfane og de velanbragte borer kun monitoreret få gange. Spredning til det primære magasin, **F**, forudsætter derudover kontakt mellem den øvre og nedre sandede serie, en kontakt der ikke kan afgøres på det nuværende datagrundlag.



Figur 8.1: Konceptuel model for arsentransport fra Collstrupgrunden. Skala og lagtykkelser er omtrentlige.

Når arsenen på opløst form transporteres gennem jorden og grundvandsmagasinerne, vil stoffet i et vist omfang tilbageholdes på jordpartiklerne. I jorden på Collstrupdepotet er retardationsfaktoren af arsenen målt til mellem 10 og 180 (se kapitel 4.3.2). Med den beregnede grundvandshastighed i det sekundære magasin på ca. 350 m/år (Samfundsteknik, 1990) vil det tage forureningsfanen mellem **30 og 500 år at nå de godt 1000 meter til bredden af Esum Sø**. Beregningen forudsætter samme pH og redoxforhold i grundvandsmagasinerne som i jorden på Collstrupgrunden. Da der givet er mere reducerede forhold i magasinet end i overfladejorden, hvor målingerne er fra, ligger transporttiden nok nærmere de 30 end de 500 år. Det er altså muligt, at der allerede nu sker opstrømning af forurenat vand i søen, men også at forureningsfanen via spredningsvej **E** først vil vise sig om mange år.

8.5 Afværgeløsninger

Der er i 1990'erne opstillet en række forslag til afværgeprojekter for jord- og grundvandsforureningen på Collstrup-grunden. Projektforslagen spænder over en oprensning af jorden på stedet til forskellige deponeringsløsninger samt afværgepumpning og rensning af terrænnært grundvand.

På baggrund af forslagene til afværgeprojekter blev omkostningerne til oprensning af grunden beregnet at kunne blive op til 200 – 250 mill. kroner. Ved fastlæggelsen af dette beløb blev der anvendt en beregningsmetode, som inkluderer renteudgifterne til finansiering af oprensningsomkostningerne. Med de miljø-økonomiske

beregningsmetoder, som typisk anvendes i dag, inddrager man imidlertid ikke disse renteudgifter. Prisen for en oprensning af Collstrupdepotet må derfor – på basis af de metoder, der anvendes til at prissætte afværgeprojekter i dag - forventes at ligge væsentligt lavere end de 200-250 mill. kroner.

På baggrund af de eksisterende undersøgelser vides det, at udvaskningen af arsen fra Collstrupdepotet forårsager, at der akkumuleres arsen i sedimenterne i grøftesystemet i skoven nordøst for grunden. Spørgsmålet er, om dette er den eneste, væsentlige spredningsvej for arsen eller om der også sker en spredning til det sekundære og primære grundvandsmagasin

Før der lægges detaljerede planer for en evt. afværgeløsning, er det derfor nødvendigt at kunne give en samlet risikovurdering af depotet.

9 Litteratur

9.1 Undersøgelsesrapporter om Collstrupdepotet

Selvom Region Hovedstaden og Frederiksborg Amt formelt er forfattere af rapporterne, er de navngivet efter den rådgiver, der har forestået undersøgelsen. Det gør det nemmere, at se i teksten hvilken rapport data stammer fra.

AVJ (2000): *Undersøgelse af den kemiske sammensætning og speciering (form) af arsen i forurenede grundvand*. Frederiksborg Amt og Amternes Videnscenter for Jordforurening. Maj 2000

Cowi (1993): *Arsen i Møllekrogen – Esrum Sø. Statusnotat*. Frederiksborg Amt 1993

Cowi (1994): *Arsen i Møllekrogen Esrum Sø. Fase 2: Arsenakkumulering*. Frederiksborg Amt, Oktober 1994

Danmarks Geologiske Undersøgelser (1977): *Rapport over undersøgelse af forureningstilstanden ved Collstrup imprægneringsanstalt, Stenholtvang, Hillerød*. Udført for Hillerød Kommune. December 1977

Dansk Miljørådgivning (2008): *Forureningsundersøgelse. Eghjorten, tidl. forsøgsplanteskole, Jespervej 309, 3480 Fredensborg. Matr. nr: 4b Stenholtvang, Nødebo*. Rapport udarbejdet for Region Hovedstaden, november 2008.

DTH (1992): *Indledende forsøg med elektrokinetisk rensning af tungmetalforurenet jord fra den tidligere imprægneringsanstalt i Stenholtvang*. Lisbeth M. Ottosen og Henrik K. Hansen, Fysisk-Kemisk Institut og Institut for Geologi og Geoteknik, DTU. September 1992.

Falkenberg (2006a): *Notat – Vedr. forureningssituationen på Collstrupgrunden, Stenholtvang Hillerød*. Juni 2006

Falkenberg (2006b): *Miljøteknisk undersøgelse af grøfter samt Hjortedamssø og Mølledam beliggende ved den tidligere imprægneringsgrund Collstrup i Stenholtvang ved Hillerød (Depot 219-3)*. Frederiksborg Amt, Teknik og Miljø. Maj 2006.

Frederiksborg Amt (1992): *Undersøgelse af arsenforurening i Møllekrogen, Esrum Sø fra depot 219-3*. November 1992.

Krüger (1994): *A/S Colstrup gl træimprægneringsgrund i Stenholtvang, Hillerød. Rensning af grundvand for tungmetaller*. 1994

Levnedsmiddelstyrelsen (1995): *Arsen speciering i sediment porevand og biota i et arsenforurenet område af Esrum Sø*. Maj 1995

Niras (2000): *Affaldsdepot 219-3 Stenholtvang. Monitorering af arsenspredning. Monitoringsrapport I*. Frederiksborg amt, januar 2000

Orbicon (2009): *Arsentransport i vandløb ved Collstrupgrunden 2008 - 2009*. Rapport til Region Hovedstaden, december 2009.

Region Hovedstaden (2008): Grundvandpotentiale i kalkmagasinet 2008. Region Hovedstaden, 2008.

Rambøll (1994): *Stenholtvang. Økonomisk og miljømæssig vurdering af 6 afværgeløsninger.* September 1994

Rambøll (1995): *Stenholtvang.* Frederiksborg Amt, oktober 1995

Rambøll (1996): *Affaldsdepot nr 129-3, Stenholtvang – Oprensning af grøfter. Afslutningsrapport.* Frederiksborg Amt, oktober 1996

Samfundsteknik (1989a): *Forureningsundersøgelse af tidligere træimprægneringsanstalt Stenholtvang, Hillerød. Fase 1* Skov og Naturstyrelsen, april 1989.

Samfundsteknik (1989b): *Kemikalieaffaldsdepot 219-3, Stenholtvang. Forureningsundersøgelse Fase 2. Rapport.* Skov og Naturstyrelsen, december 1989.

Samfundsteknik (1989c): *Kemikalieaffaldsdepot 219-3, Stenholtvang. Dieselforurening. Notat.* Skov og Naturstyrelsen, december 1989.

Samfundsteknik (1990): *Kemikaliedepot 219-3, Stenholtvang. Forureningsundersøgelse Fase 3 og sammenfattende undersøgelsesrapport.* Skov og Naturstyrelsen, august 1990

Samfundsteknik (1991a): *Kemikaliedepot 219-3, Stenholtvang. Katalog over forslag til generelle afværgeforanstaltninger. Rapport.* Skov og Naturstyrelsen, juni 1991

Samfundsteknik (1991b): *Kemikaliedepot 219-3, Stenholtvang .Statusnotat.* Skov- og Naturstyrelsen, december 1991

Samfundsteknik (1992): *Notat vedrørende de mildertidige jorddepoter i Stenholtvang Hillerød kommune.* Skov og Naturstyrelsen, marts 1992

VKI (1994): *Stofudvaskning fra forurennet jord fra Stenholtvang.* August 1994.

9.2 Supplerende litteratur

Amofah, Leah Rasta (2009): *Soil washing - a sound method to remediate CCA contaminated soil?* <https://www.ltu.se/shb/2.1530/d2192/d2951/1.31311?l=en>. Igangværende PhD projekt.

Englöv, Peter (1998): *Remediation of a large wood preservation site polluted with arsenic, copper and chromium*. ATV Møde, VIntermøde om Jord- og grundvandsforurening. 10. – 11. Marts 1998.

Fendorf, S. E. (1995): *Surface reactions of chromium in soil and waters*. Geoderma 67 55-71

Hansen, Kaj (1981): *Morfologisk-geologiske studier i Nordøstsjælland*. Geografisk tidsskrift 81 1:10, København 1981.

Hillerød Kommune (2003): *Status og registrering: Stenholt Vandværk*. www.hillerod.dk/upload/teknik/planlaegning/miljoe/pdf/vandforsyning/vandforsyningsplan/2.5.%20stenholt_registreringsskema.pdf

Howard, Philip Hall (1989): *Handbook of Environmental Fate and Exposure Data for Organic Chemicals: Large production and priority pollutants*. CRC Press, 1989

Konradi, P.B. (1992): *De marine kvartære aflejringer i Esrumdalen*. Dansk geologisk forening. Årsskrift for 1990-91. Side 111-115. København, november 1992

Kumpiene, J. A. Lagerkvist, C. Maurice (2008): *Stabilization of As, Cr, Cu, Pb, and Zn in soil using amendments – A review*. Waste management 28, 215-225

Miljøministeriet (2006): *Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg* Bekendtgørelse nr. 1664 af 14.12.2006.

Miljøstyrelsen (1996): *Kemiske stoffers opførsel i jord og grundvand - bind 2*. Projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen Nr 20 1996

Miljøstyrelsen (2009): *Liste over kvalitetskriterier i relation til forurenede jord og kvalitetskriterier for drikkevand*. Oktober 2009

Nielsen, S. S. (2008): Upubliceret data. Røngtendiffraktion af lerfraktionen i prøver fra Collstrupedepotet.

Nielsen, S.S. (2007): *Stabilisering af arsen og kromforurenede jord med okkerslam fra vandværker*. Eksamensprojekt. Institut for Miljø og Ressourcer, DTU. December 2007

Ottosen, Lisbeth M.; Pernille E. Jensen, Henrik K. Hansen, Alexandra Ribeiro, og Bert Allard (2009): *Electrodialytic remediation of soil slurry-removal of Cu, Cr, and As Separation Science and Technology*, Vol. 44 nr. 10 s. 2245-2268

Pedersen, Louise Riis (2007): *Evaluering af okkerslam og nulvalent jerntil fiksering af arsen og krom fra træimplægninggrund*. Eksamensprojekt. Institut for Miljø og Ressourcer. DTU

Pickering, W.F. (1985): *The mobility of soluble fluoride in soils* Environmental pollution. Series B. Chemical and physical, vol. 9, nr 4, pp. 281-308

Schuldt, J. (1981): *Om Esrumdalens geologi*. Dansk geologisk forening. Årskrift for 1980. Side 77-81, København, januar 1981

Smedley, P.L. og D.G. Kinniburgh (2002): *A review of the source behaviour and distribution of arsenic in natural waters*. Applied Geochemistry 17, 517-568

USEPA (2008): *Field Application of a Permeable Reactive Barrier for Treatment of Arsenic in Groundwater*. Office of Research and Development. EPA600/R-08/600. September 2008

USEPA (2006): *Coast Wood Preserving*. U.S. Environmental Protection Agency, Region 9 Superfund.
<http://yosemite.epa.gov/r9/sfund/r9sfdocw.nsf/ViewByEPAID/cad063015887?OpenDocument#descr>

Som følge af træimprægneringsvirksomheden Collstrups aktiviteter på grunden i Stenholtsvang, Hillerød, er et 6 ha stort areal forurenet med metaller, arsen og en række organiske forureningskomponenter. Især arsen er potentielt en risiko for det omgivende miljø på grund af sin høje mobilitet i jord og grundvand. I den sydlige del af Esrum Sø findes forhøjede arsenkoncentrationer, der formentlig skyldes forureningen på Collstrupdepotet. Det er tidligere vurderet, at en oprensning vil koste 200-250 mill. Dkk.

Nærværende rapport er en opsamling af de mange undersøgelser, der er lavet med udgangspunkt i forureningen på Collstrupgrunden i perioden siden virksomhedens lukning i 1976 til og med udgangen af 2009. Rapportens formål er at give en præsentation af den eksisterende viden om forureningsudbredelsen, afdække mangler i de eksisterende undersøgelser og give en oversigt over afværgeforslag.

DTU Miljø
Institut for Vand og Miljøteknologi

Danmarks Tekniske Universitet
Miljøvej, bygning 113
2800 Kgs. Lyngby

Tlf: 4525 1600
Fax: 4593 2850

E-post: reception@env.dtu.dk
www.env.dtu.dk

ISBN 978-87-91855-78-8